



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**

**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



## **DIPLOMSKI RAD**

**Denis Piljek**

**0035177777**

Zagreb, 2015.



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**

**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



## **DIPLOMSKI RAD**

Nositelj kolegija:

**Doc. dr. sc. Marino Grozdek**

Student:

**Denis Piljek**

**0035177777**

Zagreb, 2015.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Denis Piljek

Mat. br.: 0035177777

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Projekt rashladnog postrojenja za hlađenje proizvodnog pogona  
tvornice obuće**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Design of cooling system for air conditionig of shoes factory**

Opis zadatka:

Potrebno je izraditi projekt rashladnog sustava za hlađenje prostora proizvodnog pogona tvornice obuće površine 5.600 m<sup>2</sup> i visine 6 m. Prilikom proračuna toplinskog opterećenja prostora potrebno je uzeti u obzir sve izvore topline u hali (proizvodni strojevi, osobe itd.).

Rashladni sustav je potrebno projektirati s električno pogonjenim kompresorom, a radnu tvar odabrati na temelju važećih propisa i pravila struke.

Prilikom razrade koncepta postrojenja i konačnog odabira rješenja potrebno je provjeriti isplativost primjene rashladnog postrojenja s akumulacijom rashladnog učinka.

Rad treba sadržavati:

1. Proračun toplinskog opterećenja hlađenog prostora.
2. Provjeru isplativosti primjene rashladnog postrojenja s akumulacijom rashladnog učinka.
3. Tehnički opis odabranog rješenja sustava.
4. Proračun te izbor osnovnih komponenata rashladnog postrojenja.
5. Shemu spajanja i automatske regulacije rashladnog sustava.
6. Dispozicijski crtež strojarnice i ostale relevantne opreme (smještaja kondenzatora i/ili spremnika rashladnog učinka).

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

7. svibnja 2015.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Marino Grozdek

Rok predaje rada:

9. srpnja 2015.

Predviđeni datumi obrane:

15., 16. i 17. srpnja 2015.

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

*Ovom prilikom bih želio zahvaliti:*

*Voditelju rada doc. dr. sc. Marinu Grozdeku na stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade završnog rada.*

*Posebno bih želio zahvaliti svojoj obitelji – roditeljima Vjekoslavu i Tatjani, te sestri Ines na razumijevanju, potpori i pomoći kako tijekom izrade ovog rada, tako i tijekom cijelog studija.*

*Također zahvaljujem svojim kolegama i prijateljima na potpori i pomoći tijekom svih ovih godina studiranja.*

## **SAŽETAK:**

Potrebno je izraditi projekt rashladnog sustava za hlađenje prostora proizvodnog pogona tvornice obuće površine 5600 m<sup>2</sup> i visine 6 m. Prilikom proračuna toplinskog opterećenja prostora potrebno je uzeti u obzir sve izvore topline u hali.

Rashladni sustav je potrebno projektirati s električno pogonjenim kompresorom, a radnu tvar odabrati na temelju važećih propisa i pravila struke,

Prilikom izrade koncepta postrojenja i konačnog odabira rješenja potrebno je provjeriti isplativost primjene rashladnog postrojenja a akumulacijom rashladnog učinka.

## SADRŽAJ:

Popis slika .....	III
Popis tablica .....	V
Popis oznaka i mjernih jedinica .....	VII
<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1. Teorijske osnove .....	1
1.2. Toplinska ugodnost.....	1
1.3. Unutarnja i vanjska projektna temperatura .....	2
<b>2. TERMODINAMIČKE OSNOVE .....</b>	<b>4</b>
2.1. Kondukcija (provođenje) .....	4
2.2. Konvekcija .....	5
2.3. Zračenje.....	5
2.4. Koeficijent prolaza topline.....	6
<b>3. OPIS I LOKACIJA OBJEKTA .....</b>	<b>9</b>
3.1. Općenito o tvornici obuće »Bema« .....	9
3.2. Lokacija objekta .....	9
3.3. Tehnički opis objekta .....	10
3.4. Proračun toplinskog opterećenja prema VDI 2078 .....	16
3.4.1. Analiza rezultata toplinskog opterećenja prema VDI 2078 .....	23
<b>4. ENERGETSKO – EKONOMSKA ANALIZA ISPLATIVOSTI RASHLADNOG POSTROJENJA S AKUMULACIJOM RASHLADNOG UČINKA U ODNOSU NA SUSTAV BEZ AKUMULACIJE .....</b>	<b>31</b>

4.1. Općenito o akumulaciji rashladne energije .....	31
4.2. Analiza cilindričnog spremnika pri procesu punjenja i pražnjenja rashladnom energijom.....	34
4.3. Potrošnja energije i pogonski troškovi rashladnog postrojenja s akumulacijom rashladnog učinka .....	37
4.4. Potrošnja energije i pogonski troškovi rashladnog postrojenja bez akumulacije rashladnog učinka .....	42
<b>5. TEHNIČKI OPIS SUSTAVA HLAĐENJA VODOM BEZ AKUMULACIJE RASHLADNOG UČINKA .....</b>	<b>46</b>
<b>6. PRORAČUN I ODABIR OSNOVNIH KOMPONENATA RASHLADNOG POSTROJENJA .....</b>	<b>52</b>
6.1. Određivanje radnih točaka procesa .....	52
6.2. Određivanje unutarnjih promjera glavnih dionica cjevovoda, nazivnog učina kondenzatora, te snage kompresora .....	54
6.3. Proračun kondenzatora .....	60
6.3.1. Termodinamički proračun u zoni I.....	65
6.3.2. Termodinamički proračun u zoni II.....	71
6.4. Proračun isparivača .....	76
6.4.1. Termodinamički proračun u zoni I.....	82
6.4.2. Termodinamički proračun u zoni II.....	84
6.5. Odabir rashladnog tornja .....	88
6.6. Rekapitulacija odabranih osnovnih komponenata rashladnog postrojenja ....	89
<b>7. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>93</b>
<b>8. LITERATURA .....</b>	<b>94</b>

## POPIS SLIKA

Slika 1.1. Odnos između PMV i PPD indeksa .....	1
Slika 2.1. Prikaz prolaza topline i promjene temperatura kod zidova s izolacijom (višeslojna stijenka) .....	7
Slika 3.1. Lokacija tvornice BEMA u Banja Luci .....	10
Slika 3.2. Jugoistočna strana objekta, pogled prema sjeveroistoku.....	12
Slika 3.3. Jugozapadna strana objekta, pogled prema sjeveroistoku .....	13
Slika 3.4. Spojni most s uredskim prostorima i klima – split sustavima .....	14
Slika 3.5. Sjeveroistočna strana objekta, pogled prema sjeverozapadu .....	15
Slika 3.6. Ravni krov izoliran bitumenskom trakom i krovni prozori s kupolom od <i>pleksiglasa</i> .....	16
Slika 3.7. Grafički prikaz maksimalnih temperatura za svaki sat u mjesecu srpnju za grad Banja Luku .....	18
Slika 3.8. Radnice i detalj proizvodnje u tvornici obuće »Bema« .....	19
Slika 3.9. Grafički prikaz toplinskih dobitaka proizvodnog pogona od unutarnjih izvora topline za svaki sat, mjesec srpanj .....	23
Slika 3.10. Grafički prikaz vanjskih toplinskih dobitaka za svaki sat, mjesec srpanj	24
Slika 3.11. Toplinsko opterećenje proizvodnog pogona za svaki sat u mjesecu srpnju .....	26
Slika 3.12. Toplinsko opterećenje proizvodnog pogona za svaki sat i prosjek dnevnog toplinskog opterećenja za mjesec srpanj .....	26
Slika 4.1. Temperaturna stratifikacija vode u akumulacijskim spremnicima.....	34
Slika 4.2. Temperaturni profil vode u zavisnosti o vremenu trajanja punjenja i visini spremnika .....	35



Slika 4.3. Temperaturni profil vode u zavisnosti o vremenu trajanja pražnjenja i visini spremnika .....	36
Slika 4.4. Podjela dnevnog toka toplinskog opterećenja proizvodnog pogona na bazno i vršno .....	37
Slika 4.5. Godišnji pogonski troškovi za rashladno postojenje s akumulacijom rashladnog učinka i bez njega .....	45
Slika 5.1. Shema sustava hlađenja vodom, indirektni sustav općenito .....	46
Slika 5.2. Hladnjak zraka ugrađen unutar ventilacijskog kanala, s okapnicom za odvod kondenzata, tvornica obuće »Bema« - Banja Luka.....	47
Slika 5.3. Tip kompresora u zavisnosti o rashladnom učinku .....	49
Slika 6.1. Prikaz ljevokretnog rashladnog procesa u T,s dijagramu.....	53
Slika 6.2. Prikaz ljevokretnog rashladnog procesa u log p, h dijagramu.....	53
Slika 6.3. h, x dijagram - određivanje temperature granice hlađenje .....	55
Slika 6.4. »Shell & tube« tip kondenzatora .....	60
Slika 6.5. Temperature struja pri kondenzaciji u $\vartheta, A$ dijagramu .....	61
Slika 6.6. »Shell & tube« suhi tip isparivača .....	76
Slika 6.7. Temperature struja pri isparivanju u $\vartheta, A$ dijagramu.....	77
Slika 6.8. Dijagram odabira rashladnog tornja .....	89

## POPIS TABLICA

Tablica 1.1. Metabolički učinak po metru kvadratnom kože čovjeka .....	2
Tablica 1.2. Područje temperature i vlažnosti u raznim pogonima.....	3
Tablica 1.3. Maksimalne projektne i srednje dnevne temperature za četiri klimatske zone prema VDI.....	4
Tablica 2.1. Koeficijenti provođenja topline nekih građevinskih materijala po DIN EN 12524 i DIN – V 4108 – 4 .....	5
Tablica 3.1. Sumarni prikaz elektromotora i el. grijača unutar strojeva po različitim odjeljenjima proizvodnog pogona .....	20
Tablica 3.2. Toplinsko opterećenje proizvodnog pogona u kilovatima [kW] od siječnja do kolovoza, za svaki sat.....	27
Tablica 3.3. Toplinsko opterećenje proizvodnog pogona u kilovatima [kW] od rujna do prosinca, za svaki sat .....	28
Tablica 3.4. Potreba za rashladnom energijom za svaki mjesec u godini.....	29
Tablica 4.1. Karakteristike sustava akumulacije rashladnog učinka .....	32
Tablica 4.2. Potrošnja električne energije i troškovi pogona kompresora rashladnika vode s akumulacijom rashladnog učinka, za mjesec srpanj .....	39
Tablica 4.3. Potrošnja električne energije, u kilovatima [kW], za pogon kompresora rashladnika vode s akumulacijom rashladnog učinka od svibnja do listopada.....	40
Tablica 4.4. Potrošnja električne energije, u kilovatima [kW], za pogon kompresora rashladnika vode s akumulacijom rashladnog učinka od studenog do travnja.....	40
Tablica 4.5. Potrošnja električne energije i pogonski troškovi rashladnog postrojenja s akumulacijom rashladnog učinka za sve mjesece u godini.....	41
Tablica 4.6. Stupanj opterećenja rashladnika vode i pripadajući faktor hlađenja, te električna snaga potrebna za pogon kompresora rashladnika.....	42

Tablica 4.7. Stupanj opterećenja rashladnika vode i vremensko trajanje pogona	43
Tablica 4.8. Pogonski troškovi za svaki mjesec u godini .....	44
Tablica 6.1. Radne točke procesa .....	54
Tablica 6.2. Troškovnik opreme rashladnog postrojenja .....	90

## POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA

$\Phi_{isp}$  [ W ]; učinak isparivača

$\Phi_{kond}$  [ W ]; učinak kondenzatora

$P_{komp}$  [ W ]; snaga kompresora

$q_e$  [ W/m<sup>2</sup> ]; specifični toplinski tok unutar izmjenjivača topline sveden na vanjsku površinu cijevi

$q_i$  [ W/m<sup>2</sup> ]; specifični toplinski tok unutar izmjenjivača topline sveden na unutarnju površinu cijevi

$\varepsilon_{hl}$  [ - ]; faktor hlađenja

$p_k$  [ Pa ]; tlak kondenzacije

$p_i$  [ Pa ]; tlak isparivanja

$\vartheta_{kond}$  [ °C ]; temperatura kondenzacije

$\vartheta_{isp}$  [ °C ]; temperatura isparivanja

$\vartheta_{poth}$  [ °C ]; temperatura pothlađenja

$\vartheta_{ok}$  [ °C ]; temperatura okoliša

$\vartheta_{w1}$  [ °C ]; temperatura rashladne vode na ulazu u kondenzator

$\vartheta_{w2}$  [ °C ]; temperatura rashladne vode na izlazu iz kondenzatora

$\Delta\vartheta_w$  [ °C ]; zagrijavanje rashladne vode na kondenzatoru

$\vartheta_{GH}$  [ °C ]; temperatura vlažnog termometra

$q_{mRT}$	[kg/s];	maseni protok radne tvari
$q_{vRT}$	[m <sup>3</sup> /s];	volumenski protok radne tvari
$q_{vmW}$	[m <sup>3</sup> /s];	volumenski protok hladene i rashladne vode
$h$	[J/kg];	specifična entalpija
$v_w$	[m/s];	brzina strujanja rashladne vode
$\rho_1$	[kg/m <sup>3</sup> ];	gustoća radne tvari na usisu u kompresor
$\rho_2$	[kg/m <sup>3</sup> ];	gustoća radne tvari na izlazu iz kompresora
$\rho_3$	[kg/m <sup>3</sup> ];	gustoća ukapljene radne tvari
$v_1$	[m/s];	brzina strujanja radne tvari u usisnom dijelu cjevovoda
$v_2$	[m/s];	brzina strujanja radne tvari u tlačnom dijelu cjevovoda
$v_3$	[m/s];	brzina strujanja radne tvari u kapljevinskom dijelu cjevovoda
$A$	[m <sup>2</sup> ];	površina slobodnog strujanja fluida
$\rho_w$	[kg/m <sup>3</sup> ];	gustoća vode
$\lambda_w$	[W/mK];	toplinska vodljivost vode
$c_w$	[kJ/kgK];	specifični toplinski kapacitet vode
$C$	[W/K];	toplinski kapacitet vode
$\mu_w$	[Pas];	dinamička viskoznost vode
$\nu_w$	[m <sup>2</sup> /s];	kinematička viskoznost vode
$d_v$	[mm];	vanjski promjer cijevi
$d_u$	[mm];	unutarnji promjer cijevi
$d_m$	[mm];	srednji promjer cijevi
$s_c$	[mm];	debljina stijenke cijevi

$s$	[mm];	osni razmak između cijevi
$D$	[m];	promjer plašta izmjenjivača
$L$	[m];	duljina izmjenjivača
$L_{ov}$	[m];	ukupna duljina cijevi izmjenjivača topline
$n_p$	[-];	broj prolaza rashladne vode kroz izmjenjivač topline
$n_t$	[-];	ukupan broj cijevi izmjenjivača topline
$A_e$	[m <sup>2</sup> ];	površina izmjene topline
$\Delta t_m$	[°C];	srednja logaritamska temperaturna razlika
$\alpha_w$	[W/m <sup>2</sup> K];	koeficijent prijelaza topline na strani vode
$f_w$	[-];	korekcijski faktor
$B_w$	[-];	koeficijent koji sadrži fizikalna svojstva vode
$Re$	[-];	Reynoldsov broj
$\lambda_1$	[W/mK];	toplinska vodljivost čelične cijevi
$\lambda_2$	[W/mK];	toplinska vodljivost kamenca
$R_1$	[m <sup>2</sup> K/W];	toplinski otpor provođenju topline kroz cijevnu stijenku
$R_2$	[m <sup>2</sup> K/W];	toplinski otpor na strani vode uslijed stvaranja kamenca na unutarnjoj površini cijevne stijenke
$R_3$	[m <sup>2</sup> K/W];	toplinski otpor uslijed stvaranja hrđe i ostalog taloga (mulja)
$R_{uk}$	[m <sup>2</sup> K/W];	ukupni toplinski otpor
$\vartheta_z$	[°C];	temperatura površine cijevne stijenke na strani vode

$\alpha_{RT}$	[W/m <sup>2</sup> K];	koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari
$g$	[m/s <sup>2</sup> ];	Zemljina gravitacija, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
$r$	[kJ/kg];	specifična toplota kondenzacije
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ];	gustoća radne tvari
$\lambda$	[W/mK];	toplinska vodljivost radne tvari
$\mu$	[Ns/m <sup>2</sup> ];	dinamička viskoznost radne tvari
$f$	[-];	srednji broj cijevi u vertikalnom redu
$k$	[W/m <sup>2</sup> K];	ukupni koeficijent prolaza topline
$\Delta p$	[Pa];	pad tlaka na strani vode
$\zeta_{in}$	[-];	lokalni koeficijent otpora prilikom ulaska vode u snop cijevi izmjenjivača
$\zeta$	[-];	linijski koeficijent otpora

# 1. Uvod

## 1.1. Teorijske osnove

Jedan od bitnih razloga hlađenja neke prostorije je postizanje toplinske ugodnosti osoba koje borave unutar nje. Zadavanjem parametara toplinske ugodnosti definira se toplinsko opterećenje pojedine prostorije i zahtjevi za hlađenjem. Dalje u nastavku će biti detaljnije objašnjeni pojmovi toplinske ugodnosti, vanjske i unutarnje projektne temperature.

## 1.2. Toplinska ugodnost

Temeljni zadatak sustava hlađenja je održavanje toplinske ugodnosti, odnosno osiguravanje toplinskih uvjeta kod kojih se korisnici prostora osjećaju ugodno. Prema normi ISO 7730 toplinska ugodnost je definirana kao stanje svijesti koje izražava zadovoljstvo s toplinskim stanjem okoliša. S obzirom da je osjećaj ugodnosti individualan, pretpostavlja se da je okoliš ugodan ako je 90% osoba zadovoljno. Zadatak GVK sustava je ostvarivanje uvjeta koji će odgovarati najvećem mogućem broju osoba u nekom prostoru. Glavni faktori koji utječu na toplinsku ugodnost su: temperatura zraka i relativna vlažnost u prostoriji, temperatura ploha u prostoriji, brzina strujanja zraka, razina odjevenosti, kvaliteta zraka, buka, namjena prostora, razina fizičke aktivnosti itd. Toplinska ugodnost je rezultat zajedničkog djelovanja svih navedenih faktora. [1]

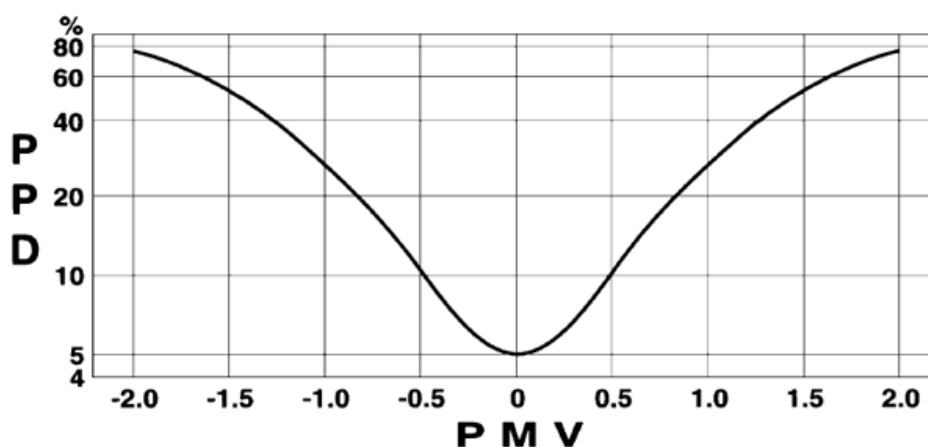
U zavisnosti od fizičke aktivnosti osoba predaje okolišu različitu toplinu preko površine kože; dijeli se na latentnu i osjetnu toplinu. Latentna toplina je toplina dobivena ishlapljivanjem vode s površine kože i vlagom koja se prenosi disanjem. Osjetna toplina je toplina predana zraku prostorije uslijed temperaturne razlike između površine kože i zraka. Ukupna toplina koje osobe odaju u okoliš neke prostorije jednaka je zbroju latentne i osjetne topline. Kao orijentacijske vrijednosti toplina predanih od osoba u zavisnosti od razine fizičke aktivnosti, prikazane su u tablici 1.1. Zbog velikih odstupanja predane topline od osoba u zavisnosti o razini fizičke aktivnosti, potrebno ih je dobro poznavati.



Tablica 1.1. Metabolički učinak po metru kvadratnom kože čovjeka. [1]

Razina fizičke aktivnosti	Metabolički učinak [ $\text{W/m}^2$ ]
Odmaranje – spavanje	46
Mirno sjedenje	58
Pisanje na računalu	65
Stajanje (opušteno)	70
Vožnja automobilom	60 – 115
Šetanje	100
Pranje posuđa u stojećem položaju	145
Hodanje po ravnicima brzinom 4,3 km/h	150
Teški rad za strojem	235
Rad na gradilištu	275
Sport – trčanje brzinom 15 km/h	550

Za određivanje toplinske ugodnosti koristi se uobičajeni dijagram koji na ordinati sadrži PPD vrijednosti (*engl. Percentage of Persons Dissatisfied*; u prijevodu - postotak nezadovoljnih osoba), a na apscisi PMV vrijednosti (*engl. Predicted Mean Vote*; u prijevodu – subjektivno ocjenjivanje ugodnosti boravka u okolišu). Maksimalne vrijednosti PMV skale se kreću od -3 što bi označavalo ledeno, do 3 za vruće. Nulta vrijednost na PMV skali označava neutralno stanje. Iz dijagrama na slici 1.1. je lako uočljivo da i kad je postignuto neutralno stanje toplinske ugodnosti, uvijek se javlja 5% nezadovoljnih osoba. To nezadovoljstvo se pripisuje subjektivnom ocjenjivanju toplinske ugodnosti.



Slika 1.1. Odnos između PMV i PPD indeksa. [1]

### 1.3. Unutarnja i vanjska projektna temperatura

Održavanje unutarnje projektne temperature prostorije unutar zadanih granica izrazito je bitno ne samo zbog postizanja željene toplinske ugodnosti, nego i zbog neometanog odvijanja eventualnih proizvodnih procesa. Inače, osim unutarnje temperature bitan je i sadržaj vlage u zraku. U tablici 1.2. prikazane su preporučene unutarnje projektne temperature i relativna vlažnost u raznim pogonima gdje se obavljaju određene djelatnosti. Pri tim stanjima zraka ljudi se osjećaju najugodnije i imaju veliku radnu sposobnost. Na taj način se povezuje i ekonomska korist, jer se ne smanjuje radna snaga zbog bolesti ili ozljeda na radu, a i rezultati rada će biti bolji.

Tablica 1.2. Područje temperature i vlažnosti u raznim pogonima [2]

Broj	Grana industrije	Vrsta pogona	Temperatura [°C]	Relativna vlažnost [%]
1.	Pekara	Skladište brašna	15...25	50...60
		Skladište kvasca	0...5	60...75
		Proizvodnja tijesta	23...25	50...60
		Skladište šećera	25	35
2.	Industrija strojeva	Uredi, sklapanje, montaža	20...24	35...55
		Precizna montaža	22...24	40...50
3.	Industrija gume	Skladištenje	16...24	40...50
		Proizvodnja	31...33	-
		Vulkaniziranje	26...28	25...30
4.	Pivovara	Prostorija za vrenje	4...8	60...70
		Skladište slada	10...15	80...85
5.	Tekstilna industrija	Proizvodnja pamuka	22...25	40...90
		Proizvodnja lana	18...27	50...80
		Proizvodnja vune	27...29	50...70
		Proizvodnja svile	24...27	60...75
		Proizvodnja umjetnih vlakana	21...25	60...75

Vanjska projektna temperatura ovisi o mjestu gdje je objekt smješten i o godišnjem dobu. Temperatura koja vlada na jednom mjestu pokazuje, kroz vrijeme, dnevne i godišnje oscilacije čiji je uzrok promjenjivo stanje Sunca. S obzirom da je tema ovog diplomskog rada hlađenje u ljetnom i prijelaznom razdoblju, razmatrat će se maksimalne projektne kao i srednje dnevne temperature za karakteristične dane u

srpnju i rujnu. Te temperature su prema normi VDI 2078 pripisane za četiri klimatske zone u Njemačkoj.

Tablica 1.3. Maksimalne projektne i srednje dnevne temperature za četiri klimatske zone prema VDI [4]

Zona	Maksimalna projektna temperatura [°C]		Srednja dnevna temperatura [°C]	
	Srpanj	Rujan	Srpanj	Rujan
1.	29	24	22,9	17,2
2.	31	24,4	24,3	16,6
3.	32	27	24,8	18,9
4.	33	28	24,9	18,9

## 2. Termodinamičke osnove

S obzirom da se proračun toplinskog opterećenja neke prostorije temelji na tri osnovna modela izmjene topline: kondukcijom (provođenje topline), konvekcijom i zračenjem; ukratko će biti iznesene osnove za svaki od njih. Za određivanje toplinskog opterećenja prostorije potrebno je izračunati koeficijente prolaza topline za svaku plohu koja okružuje tu prostoriju. Tu se podrazumijevaju i prozori, te vrata. Debljina i tip prozora i vrata imaju utjecaja na koeficijent prolaza topline. Zbog samog pojednostavljenja proračuna, svi procesi izmjene topline će se promatrati u stacionarnom stanju.

### 2.1. Kondukcija (provođenje topline)

Provođenje je najjednostavniji model izmjene topline. Za projekt ovog diplomskog rada provođenje će biti ograničeno na ravnu i višeslojnu stijenku, zbog karakteristika zida u građevini. Jednadžba (1.1.) predstavlja izraz za gustoću toplinskog toka kroz ravnu, višeslojnu stijenku.

$$q = \frac{\Phi}{A} = \frac{\Delta \vartheta}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} \quad (2.1.)$$

Koeficijent  $\lambda$  (W/mK) u jednadžbi (2.1.) predstavlja koeficijent toplinske vodljivosti materijala, a zavisi o njegovoj gustoći i strukturi. Debljina materijala  $\delta$  (m) određuje utjecaj pojedinog sloja na rezultat gornje jednadžbe. U tablici 2.1. prikazani su koeficijenti toplinske vodljivosti najčešće korištenih materijala pri izgradnji objekata. Postoji značajna razlika između pojedinih materijala, pa je njihov izbor od presudne važnosti za konačno toplinsko opterećenje prostorije (objekta).

Tablica 2.1. Koeficijenti provođenja topline nekih građevinskih materijala po DIN EN 12524 i DIN – V 4108 – 4 [2]

Građevinski materijal	Gustoća $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda$ [W/mK]
Šljunčani beton	2400	2,1
Porozni beton (plinobeton)	1800	1,1
Opeka (suha)	1600 – 1800	0,38 – 0,52
Staklo	2500	0,8 – 1,1
Drvo (bor, jela)	500 – 600	0,1 – 0,165
Pločice	2000	1
Granit	2800	3,5
Linoleum	1000	0,17
Guma	1100	0,16 – 0,23
Bitumen	1100	0,17

## 2.2. Konvekcija

Prijelaz topline s krute tvari na okolni fluid (zrak, voda itd.) naziva se konvekcija. U građevini, prijelaz topline se odvija sa zidova na okolni zrak. Jednadžba (2.2.) prikazuje izraz za gustoću toplinskog toka kod konvekcije.

$$q = \frac{\Phi}{A} = \alpha_k \cdot (g_{zid} - g_{zrak}) \quad (2.2.)$$

Koeficijent  $\alpha_k$  u jednadžbi (2.2.) predstavlja koeficijent prijalaza topline koji ovisi o brzini strujanja fluida uz stijenku, temperaturi, viskoznosti, geometriji zida itd. Koeficijent prijelaza topline definiran je jednadžbom (2.3.).

$$\alpha_k = \frac{Nu \cdot \lambda}{l_0} \quad (2.3.)$$

U jednadžbi (2.3.) Nu predstavlja bezdimenzijsku značajku (Nusseltov broj) koji zavisi o vrsti strujanja (laminarno ili turbulentno).  $l_0$  predstavlja karakterističnu veličinu

stijenke dobivenu dijeljenjem volumena zida s njegovom unutarnjom ili vanjskom površinom, ovisno o tome da li je koeficijent prijelaza topline sveden na unutarnju ili vanjsku površinu.

### 2.3. Zračenje

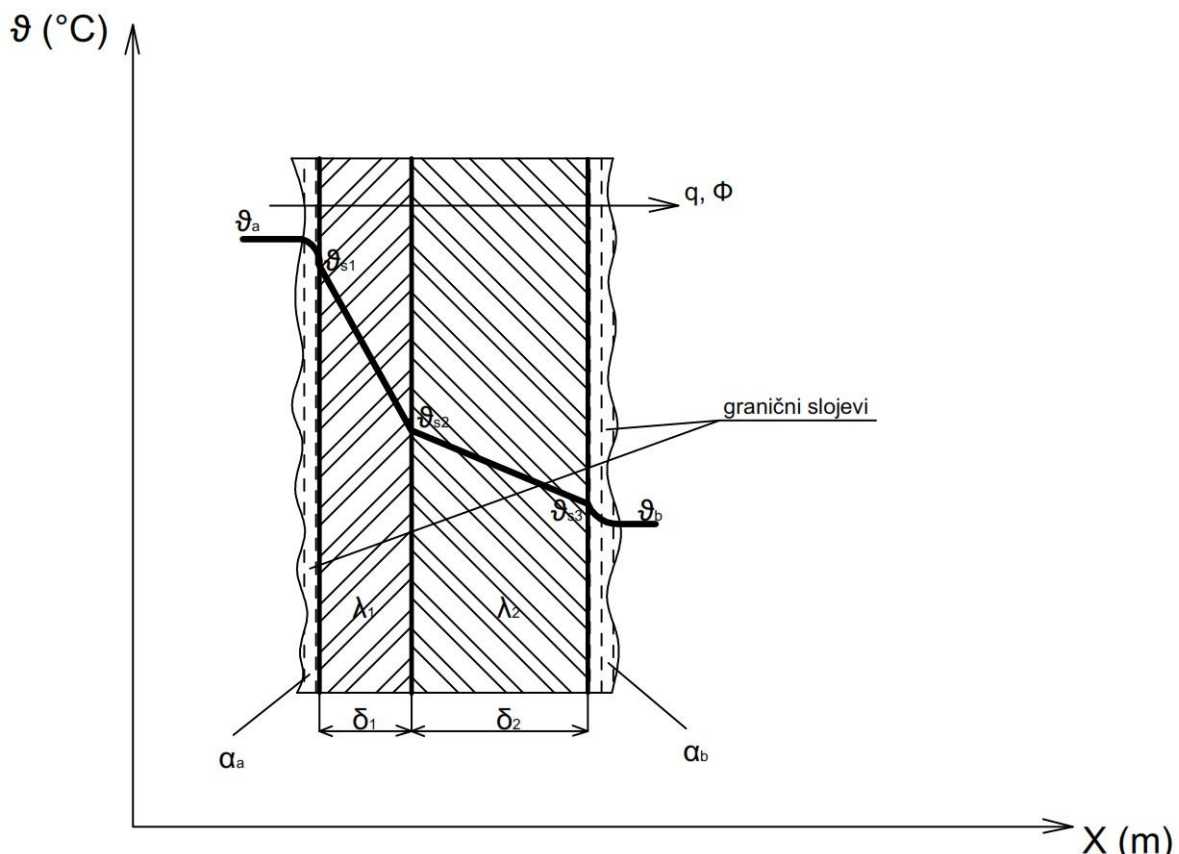
Svako tijelo koje je zagrijano na temperaturu veću od 0K, emitira elektromagnetske valove. Općenito, tijelo pri zračenju zrači na cjelokupnom spektru valnih duljina, odnosno na valnim duljinama  $0 \leq \lambda \leq +\infty$ . Sveukupno prenesena energija neće se jednoliko raspodijeliti na sve valne duljine. Može se dogoditi da se zračenjem najprije prenosi najveći dio energije na kratkim valovima, ali ako te zrake prođu kroz neki materijal koji apsorbira kratke valove, onda će se u propuštenom zračenju najveći dio preostale energije prenositi na dugim valovima. Za naše područje primjene najznačajnije je toplinsko zračenje koje se aproksimativno proteže od 0,1 do 100  $\mu\text{m}$ . Sveukupno zračenje koje dolazi s površine nekog tijela sastoji se od reflektiranog, propuštenog i vlastitog emitiranog zračenja. Toplinski tok zračenjem jednak je razlici vlastitog emitiranog zračenja i apsorbiranog zračenja. Jednadžba (2.4.) prokazuje izraz za toplinski tok zračenjem.

$$\Phi = \frac{A \cdot C_c}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \cdot \left[ \left( \frac{\vartheta_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{\vartheta_2}{100} \right)^4 \right] \quad (2.4.)$$

Gdje  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$  predstavljaju emisijske faktore necrne stijenke, a  $\vartheta_1$  i  $\vartheta_2$  temperature tih stijenki između kojih se odvija izmjena topline zračenjem.  $C_c$  je konstanta zračenja crnog tijela, iznosi  $5,67 \text{ W}/(\text{m}^2(100\text{K})^4)$ . [3]  $A$  je površina izmjene topline.

### 2.4. Koeficijent prolaza topline

Sveukupni prijelaz topline s toplijeg na hladniji fluid kroz krutu razdjelnu, višeslojnu stijenku naziva se prolaz topline. Na slici 2.1. prikazan je  $\vartheta, x$  dijagram za prolaz topline kroz zid s izolacijom.



Slika 2.1. Prikaz prolaza topline i promjene temperatura kod zidova s izolacijom (višeslojna stijenka). [3]

Raspoloživi se temperaturni pad,  $\vartheta_a - \vartheta_b$ , troši na savladavanje četiri toplinska otpora. Pad temperature ( $\vartheta_a - \vartheta_{s1}$ ) uvjetovan je postojanjem toplinskog otpora kroz granični sloj »a« koji se formira neposredno uz lijevu rubnu plohu. Temperaturni padovi ( $\vartheta_{s1} - \vartheta_{s2}$ ) i ( $\vartheta_{s2} - \vartheta_{s3}$ ) posljedica su kondukcijskog toplinskog otpora kroz krutu stijenku, dok je temperaturni pad ( $\vartheta_{s3} - \vartheta_b$ ) uvjetovan toplinskim otporom u graničnom sloju »b«. Zid ima neku debljinu  $\delta_2$  i koeficijent provođenja topline  $\lambda_2$ . Izolacija zida ima debljinu  $\delta_1$  i koeficijent prolaza topline  $\lambda_1$ . Izolacijski materijal ima puno manju vrijednost koeficijenta provođenja topline od materijala zida;  $\lambda_1 \ll \lambda_2$ . Ako se promatra temperaturni profil na slici 2.1., primjećuje se veći pad temperature na dijelu izolacije, nego na dijelu zida. Postavljanjem izolacije postiže se veći toplinski otpor provođenju topline, pa su stoga i toplinski gubici, odnosno dobici, puno manji nego za slučaj bez izolacije.

Da bi prikazali gustoću toplinskog toka  $q$ , potrebno je zbrojiti gustoće toplinskog toka kod konvekcije i provođenja; prema sljedećim izrazima:

$$q = \alpha_a \cdot (g_a - g_{s1}) \quad (2.5.)$$

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} \cdot (g_{s1} - g_{s2}) \quad (2.6.)$$

$$q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} \cdot (g_{s2} - g_{s3}) \quad (2.7.)$$

$$q = \alpha_b \cdot (g_{s3} - g_b) \quad (2.8.)$$

Jednostavnim matematičkim preinakama dobivamo ukupnu gustoću toplinskog toka za prolaz topline kroz višeslojnu stijenku, jednačba (2.9.):

$$q = \frac{g_a - g_b}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_b}} \quad (2.9.)$$

Toplinski tok se dobije množenjem gustoće toplinskog toka s površinom kroz koju prolazi toplinski tok, jednačba (2.10.):

$$\Phi = q \cdot A = \frac{g_a - g_b}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_b}} \cdot A \quad (2.10.)$$

Gornja jednačba se može napisati u malo drugačijem obliku:

$$\Phi = k \cdot A \cdot (g_a - g_b), \quad (2.11.)$$

pa je shodno jednačbi (2.11), koeficijent prolaza topline:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_b}} \quad (2.12.)$$

### **3. Opis i lokacija objekta**

#### **3.1. Općenito o tvornici obuće »Bema«**

Tvornica obuće BEMA d.o.o. Banja Luka osnovana je u ljeto 2004. godine od strane dvojice privatnika - jednog iz Republike Srpske i jednog iz Republike Slovenije. Potpisivanjem ugovora o zakupu poslovnih prostora s tvornicom obuće BOSNA iz Banja Luke, započeta je sanacija devastiranog objekta, te nabavka novih strojeva i opreme. U početku je tvornica zapošljavala oko 150 radnika, da bi se taj broj popeo na oko 1250 radnika u 2015. godini. Zahvaljujući iskustvu osnivača BEMA-e u proizvodnji obuće, već u prvim mjesecima rada započeta je proizvodnja obuće za poznate svjetske proizvođače poput »Paul Green«, »Rohde«, »Fidelio«, »Adidas« itd. Osim proizvodnje za strano tržište, jedan od najznačajnijih projekata na tržištu Bosne i Hercegovine je proizvodnja svečane obuće za potrebe Vojske Bosne i Hercegovine. Tokom dugogodišnjeg iskustva ostvareni su uvjeti za proizvodnju svih vrsta obuća; tako da se danas proizvodi visokomodna ženska, muška, dječja i sportska obuća, brizgana obuća itd. U 2013. godini ostvaren je izvoz u iznosu od 14 milijuna KM, što je 10 % prihoda grada Banja Luke.

Veliki naponi se ulažu u redovno prikupljanje informacija o najnovijim trendovima u proizvodnji obuće. Te informacije služe za poboljšavanje proizvodnje s ciljem zadovoljavanja sve zahtjevnijih kriterija kupaca u pogledu kvalitete i rokova isporuke na tržišta Njemačke, Austrije, Italije i Slovačke.

Osim ugovora sa stranim partnerima, plan je kreirati vlastiti brend i započeti proizvodnju obuće iz vlastitog asortimana. U planu je također otvaranje tvorničkog dućana u kojem bi se prodavala obuća iz vlastite kolekcije.

#### **3.2. Lokacija objekta**

Tvornica obuće BEMA smještena je na južnom kraju grada Banja Luke, u naselju Obilićevo, 200 - tinjak metara od rijeke Vrbas. Na slici 3.1. na karti »Google Maps« crvenim krugom je označena točna lokacija. Banja Luka je glavni i najveći grad Republike Srpske, te kao takav ima dobru prometnu povezanost što je predispozicija za gospodarski rast tvornice. Banja Luka je od nedavno spojena modernom autocestom na glavni prometni pravac - autocestu A3 (Bregana - Lipovac). Od Zagreba je Banja Luka udaljena oko 170 kilometara.





Slika 3.1. Lokacija tvornice BEMA u Banja Luci (crveni krug)

### 3.3. Tehnički opis objekta

Proizvodni pogoni tvornice BEMA građeni su u periodu između 1970. i 1974. godine, da bi 1974. godine počeli s radom kao tadašnja tvornica obuće BOSNA. Visina objekta iznosi 12 metara, a sastoji se iz prizemlja i prvog kata. Svaka etaža je iste visine, te iznosi 6 metara. Konstrukcija je izvedena kao armirano - betonska u kombinaciji sa staklenim stijenama postavljenim po cijelom oplošju zgrade, a krov je ravni. Orijentacija zgrade je postavljena u smjeru sjeverozapad - jugoistok. Tlocrtno, zgrada ima oblik pravokutnika s dimenzijama 79x69 metara.

Prizemlje je svojim najvećim dijelom iskorišteno kao skladište materijala (koža, guma, tkanina) koje služi za izradu obuće. Jedan dio zauzima strojni park gdje se proizvode brizgani dijelovi obuće iz sirovinskog materijala. Najmanji dio otpada na kompresorsku stanicu gdje se priprema stlačeni zrak koji se cijevnim razvodom dalje

transportira prema proizvodnom pogonu na prvom katu. Tamo se koristi u daljnjem tijeku proizvodnje obuće. Osim kompresorske stanice, tu je smješten i ventilator koji služi za dobavu svježeg zraka u proizvodni pogon na prvom katu. Tlocrtna površina prizemlja iznosi  $5450 \text{ m}^2$ . Prizemlje nema izveden sustav hlađenja, nego se ono ostvaruje na principu prirodne cirkulacije zraka uslijed razlike tlakova nastalog otvaranjem prozora na kip i strujanja vanjskog zraka, vjetra. Mjerenjima je ustanovljeno da se temperatura zraka u prizemlju zgrade kreće oko  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  i to za vrijeme najvećih vrijednosti temperatura vanjskog zraka u ljetnom periodu.

Na prvom katu objekta smješten je kompletni proizvodni pogon tvornice obuće. Tlocrtna površina je ista kao i tlocrtna površina prizemlja. Pristup prvom katu moguć je na dva načina. Jedan od njih je pomoću dva teretna dizala koji služe za dopremanje materijala iz skladišta u prizemlju. Stubište je drugi način pristupa prvom katu. Po dva stubišta nalaze se na jugozapadnoj i sjeveroistočnoj strani. Tehnički opis prvog kata bit će nešto detaljniji s obzirom da se tema diplomskog rada odnosi na hlađenje proizvodnog pogona na prvom katu. U nastavku, opisi oplošja odnose se samo na prvi kat.

Jugoistočna strana dugačka je 69 metara. Po svom oplošju na prvom katu ima smješteno ukupno 14 komada staklenih stijena međusobno odvojenih armirano - betonskim, nosećim stupovima poprečnog presjeka  $0,3 \times 0,45$  metara. Svi stupovi kojima su odijeljene staklene stijene su istih dimenzija, pa se u nastavku opisa objekta te vrijednosti više neće pisati. Dimenzija jedne stijene iznosi  $4 \times 3,5$  metara. Okvir u kojem su smještene izrađen je od čelika koji je zaštićen premazom za metal protiv stvaranja korozije. Staklena stijena sastoji se 10 komada U - profila od *kopelit* stakla debljine 30 mm i širine 0,28 metara. Na sredini stijene se nalazi prozirno, dvoslojno staklo širine 0,56 metara. Ostatak oplošja objekta jugoistočne strane je zid debljine 0,4 metara napravljen od armiranog betona. Zid sa svoje vanjske strane nije obložen nikakvom izolacijom, nego je samo nanesen tanki, završni sloj fasade. Površina oplošja prvog kata jugoistočne strane iznosi  $345 \text{ m}^2$ . Od toga na staklene stijene otpada  $196 \text{ m}^2$ , odnosno 57%. Slika 3.2. prikazuje jugoistočnu stranu objekta.



Slika 3.2. Jugoistočna strana objekta, pogled prema sjeveroistoku.

Jugozapadna strana dugačka je 79 metara. Oplošje prvog kata sadrži 14 staklenih stijena. Dimenzija jedne stijene iznosi 4,6x3,5 metara, a sastoji se od 12 komada U - profila od *kopelit* stakla debljine 30 mm i širine 0,28 metara. Na sredini stijene se nalazi prozirno, dvoslojno staklo širine 0,56 metara. Na jugozapadnoj strani smještena su dva stubišta koja su samo jednom svojom stranom prislonjena uz objekt. Stubište je od proizvodnog pogona odvojeno betonskim zidom debljine 0,2 metara, duljine 5,5 metara, visine 6 metara i drvenim vratima dimenzija 1,8x2,3 metara. Na slici 3.3. prikazana je kompletna jugozapadna strana iz smjera parkirališta ispred tvornice.





Slika 3.3. Jugozapadna strana objekta, pogled prema sjeveroistoku.

Sjeverozapadna strana je identična jugoistočnoj strani što se tiče dimenzija. Razlika je u tome što ima 12 staklenih stijena. Točno na polovici duljine nalazi se takozvani *spojni most* koji spaja objekt proizvodnog pogona tvornice obuće sa susjednom upravnom zgradom u kojem se nalaze poslovni uredi. Spojni most je zatvorenog oblika, a kroz njega prolazi glavni hodnik iz kojeg se ulazi u uredske prostorije ili sanitarni čvor. Svaki uredski prostor ima instaliran *klima – split sustav*, te korisnici mogu individualno po želji namještati vrijednosti temperatura zraka u uredu. Most je od prvog kata proizvodnog pogona odijeljen armirano – betonskim zidom debljine 0,2 metara, duljine 11,8 i visine 6 metara i drvenim vratima dimenzija 1,8x2,3 metara. Spojni most s uredskim prostorima i klima – split sustavima prikazan je slikom 3.4.



Slika 3.4. Spojni most s uredskim prostorima i klima – split sustavima

Sjeveroistočna strana je dimenzionalno ista kao jugozapadna, a broj staklenih stijena iznosi 8. Osim dva stubišta, ostatak oplošja je zaklonjen dvama objektima koji nisu prislonjeni direktno uza zid nego postoji mali razmak između njih. Jedan od tih objekata pripada susjednoj školi, a drugi pripada skladištu tvornice obučne. Slika 3.5. prikazuje sjeveroistočnu stranu objekta.



Slika 3.5. Sjeveroistočna strana objekta, pogled prema sjeverozapadu.

Krov objekta je izveden kao ravni s vrlo blagim nagibom ( $1 - 2\%$ ) prema sredini gdje je sabirni kanal za odvod oborinskih voda. Krov je izrađen od armirano – betonskih ploča koje su postavljene na noseće stupove. Kao izolacija služi bitumenska traka debljine 30 – tak milimetara. Na krovu se nalazi sveukupno 98 komada krovnih otvora dimenzija 1,5x2,4 metara. Otvori su raspoređeni u 14 redova, a u svakom redu se nalazi 7 komada. Otvori su zatvoreni kupolastim poklopcem debljine 10 milimetara, izrađenim od poli (meti – metakrilata), PMMA, poznatiji pod nazivom *pleksiglas*. Kupolasti poklopci se mogu djelomično otvoriti, kako je to prikazano slikom 3.6., hidrauličkim mehanizmom kojim se upravlja iz pogona proizvodnje na prvom katu.





Slika 3.6. Ravni krov izoliran bitumenskom trakom i krovni prozori s kupolom od *pleksiglasa*

### 3.4. Proračun toplinskog opterećenja prema VDI 2078

Sa svrhom određivanja toplinskog opterećenja zgrade, potrebno je napraviti model prema kojem će se vidjeti koliko je topline u prosjeku potrebno odvesti iz proizvodnog pogona na prvom katu tvornice obuće da bi se pri tome održala konstantna željena temperatura zraka. Za izračunavanje toplinskog opterećenja korišten je program pod nazivom *IntegraCad* instaliran u računalnoj učionici Laboratorija za toplinu i toplinske uređaje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ovaj računalni program radi prema normi VDI 2078. U nastavku će biti objašnjen i analiziran svaki korak proračuna u *IntegraCad* – u.

Ukupno toplinsko opterećenje proizvodnog pogona,  $Q_{KR}$  se može podijeliti na toplinsko opterećenje uslijed unutarnjih izvora topline,  $Q_I$  i na toplinsko opterećenje uslijed vanjskih izvora topline (Sunce),  $Q_A$ .

$$Q_{KR} = Q_I + Q_A \quad (3.1.)$$

Unutarnje toplinsko opterećenje jednog prostora sastoji se od parcijalnih toplinskih opterećenja uslijed predaje topline od osoba  $Q_P$ , predaje topline od stvari  $Q_E$  i od one topline koja dolazi preko unutarnjih površina iz susjednih prostorija  $Q_R$ .

Kod  $Q_E$  se razlikuje između toplinskog opterećenja od topline rasvjetnih tijela  $Q_B$ , topline od strojeva i uređaja  $Q_M$ , odavanje topline kod prolaznih materijala kroz prostor  $Q_G$  itd.

Dakle,

$$Q_I = Q_P + Q_E + Q_R, \quad (3.2.)$$

uz

$$Q_E = Q_B + Q_M + Q_G \quad (3.3.)$$

Vanjsko toplinsko opterećenje obuhvaća onu energiju koja izvana ulazi preko površina kojima je objekt okružen, ukoliko se ista mora odvoditi iz zraka prostora. Načelno se dijeli u tokove toplinskih struja kroz zidove (krovove)  $Q_W$  i prozore  $Q_F$ . Utjecaj izmjene zraka kroz ventilacije fuge na objektu dobije se komponentom  $Q_{FL}$ .

$$Q_A = Q_W + Q_F + Q_{FL} \quad (3.4.)$$

Kod toplinskog dobitka kroz prozor  $Q_F$  razlikuje se toplina transmisijom  $Q_T$  i toplina zračenjem  $Q_S$ .

$$Q_F = Q_T + Q_S \quad (3.5.)$$

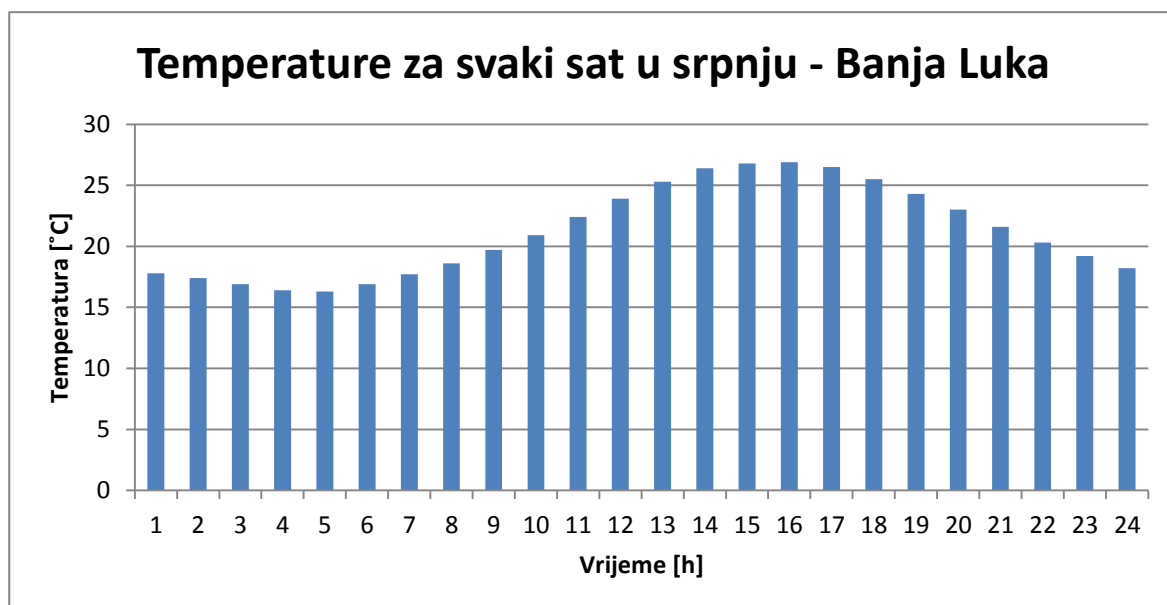
Za početak je potrebno unijeti gabaritne mjere prostorije za koju želimo izračunati toplinsko opterećenje, a to su duljina, širina i visina. Program po tome automatski izračunava sveukupnu površinu i volumen prostorije.

Sljedeće što je vrlo bitno za odrediti je klimatska zona u kojoj je smješten promatrani objekt. Prema normi VDI 2078 ponuđene su četiri klimatske zone za pojedina geografska područja u Njemačkoj. Za svaku zonu upisane su vrijednosti temperatura vanjskog zraka za svaki sat u srpnju. U srpnju se postižu maksimalne vrijednosti temperatura gledajući kroz cijelu godinu, a i zračenje Sunca je najintenzivnije. Lokacija tvornice obuće je grad Banja Luka. S obzirom da se Republika Njemačka i Federacija Bosne i Hercegovine ne nalaze blizu jedna drugoj, bilo je potrebno



najprije provjeriti koja bi od četiri klimatske zone, opisane u normi VDI 2078, najbolje odgovarala mikroklimatskom području grada Banja Luke.

Od Republičkog hidrometeorološkog zavoda Republike Srpske zatraženi su podaci o maksimalnim temperaturama za svaki sat u mjesecu srpnju u periodu od 2005. – 2014. godine. Analizom dostavljenih podataka utvrđeno je veće odstupanje od onih vrijednosti za svaku klimatsku zonu iz norme. Na slici 3.7. grafički je prikazana dnevna raspodjela temperatura vanjskog zraka za mjesec srpanj na satnoj osnovi.



Slika 3.7. Grafički prikaz temperatura zraka za svaki sat u mjesecu srpnju za grad Banja Luku.

Program *IntegraCad* nudi opciju dodavanja individualne klimatske zone, pa je za ovaj primjer proračuna dodana klimatska zona *Banja Luka* s vrijednostima temperatura kakve su u grafikonu na slici 3.7.

Unutarnja projektna temperatura zraka koja se želi održavati u proizvodnom pogonu postavljena je na vrijednost 25 °C. Ova vrijednost je odabrana kao neka srednja vrijednost iz tablice 2. gdje su navedene uobičajene temperature zraka u raznim proizvodnim pogonima. Za ovaj slučaj odabrana je tekstilna industrija gdje se raspon tih temperatura kreće od 18 °C do 29 °C.

Podatak o broju zaposlenih u tvornici obuće dobiven je od strane kadrovske službe. Radi se u dvije radne smjene, s prosjekom od 500 zaposlenih u jednoj radnoj smjeni. Zaposleni su uglavnom žene; mlađe i srednje životne dobi. Većina poslova koje obavljaju svodi se na sjedenje za šivaćim strojem, krojenje, lijepljenje i montaža. Svi ti poslovi okarakterizirani su kao srednje teški rad. Dvije radne smjene protežu se u periodu od 8 sati ujutro do 8 sati poslijepodne. Slika 3.8. prikazuje detalj proizvodnje obuće.



Slika 3.8. Radnice i detalj proizvodnje u tvornici obuće »Bema«

Rasvjeta koja je instalirana unutar proizvodnog pogona ugrađena je na strop, a na pojedinim dijelovima je spuštена pomoću metalnih sajli radi boljeg osvjetljenja radnog prostora oko strojeva. Sveukupno ima oko 1750 žarulja - fluorescentnih cijevi prosječne snage 36 W. Kod određivanja toplinskog od rasvjetnih tijela potrebno je definirati faktor istovremenosti i stupanj opterećenja prostora. Prema normi VDI 2078 faktor istovremenosti vremenski udio trajanja rasvjete u onim zonama blizu prozora gdje ne treba cijelo vrijeme umjetna rasvjeta, nego je dovoljna prirodna rasvjeta, od Sunca. Konkretno, za ovaj slučaj vrijedi da je faktor istovremenosti jednak jedinici s obzirom da je rasvjeta uključena tokom čitavog radnog vremena. Što se tiče stupnja opterećenja prostora, on prema normi nalaže da se njegova vrijednost uzme kao jedinica za svu rasvjetu koja nema ugrađen odvod zraka za njezino hlađenje.

Strojevi su podijeljeni u tri odjeljenje proizvodnog pogona: krojačnica, montaža i šivaona. U krojačnici ima sveukupno 90 strojeva, u montaži 55, a u šivaoni 375. Krojačnica ima 75 strojeva čija je prosječna snaga elektromotora 2 kW. Ostalih 15 strojeva u sebi imaju električne grijače čija je prosječna snaga oko 2 kW. Montaža

ima 25 strojeva s prosječnom snagom elektromotora 1,2 kW. Preostalih 30 strojeva u sebi ima ugrađene električne grijače različitih snaga; redom: 10 komada prosječne snage 0,08 kW, 5 komada od 0,8 kW, 7 komada od 1 kW, 5 komada od 1,5 kW i 3 komada od 2 kW. Šivaona ima 310 strojeva s prosječnom snagom elektromotora 0,5 kW. Ostatak od 65 strojeva ima sljedeće snage električnih grijača: 8 komada od 0,015 kW, 10 komada od 0,5 kW, 12 komada od 0,8 kW, 20 komada od 1 kW i 15 komada od 1,5 kW.

U tablici 3.1. sumarno je prikazan broj, snaga i srednji stupanj djelovanja elektromotora i električnih grijača koji se nalaze u strojevima unutar kompletnog proizvodnog pogona, podijeljenog na odjeljenja. Kao srednji stupanj djelovanja el. grijača uzeta je vrijednost jednaka jedinici s obzirom da se sva el. energija pretvara u toplinsku. Srednji stupanj djelovanja elektromotora, s obzirom na njegovu snagu, odabran je iz tablice A6. [VDI 2078]

Tablica 3.1. Sumarni prikaz elektromotora i el. grijača unutar strojeva po različitim odjeljenjima proizvodnog pogona.

	Elektromotor			Električni grijač		
	Broj komada	Snaga [kW]	Srednji stupanj djelovanja	Broj komada	Snaga [kW]	Srednji stupanj djelovanja
Krojačnica	75	2	0,8	15	2	1
Montaža	25	1,2	0,76	10	0,08	1
				5	0,8	1
				7	1	1
				5	1,5	1
				3	2	1
Šivaona	310	0,5	0,7	8	0,015	1
				10	0,5	1
				12	0,8	1
				20	1	1
				15	1,5	1

Od susjednih prostorija koje su odijeljene pregradnim zidom, odnosno podom od proizvodnog pogona na prvom katu, a nisu hlađene tokom ljetnog perioda, su prizemlje tvorničkog objekta i sveukupno četiri stubišta - opisano u prethodnom poglavlju. Na temelju dugogodišnjih mjerenja temperatura zraka u susjednim prostorijama (postavljeni termometri), s dovoljnom točnošću se može uzeti srednja vrijednost od 30 °C. Spojni most između upravne zgrade i proizvodnog pogona na prvom katu, unutar kojeg se isto nalaze uredi hlađeni klima - split uređajima, neće se uzimati u obzir. Ako se pretpostavi da korisnici ureda održavaju temperaturu zraka oko 25 °C, nema izmjene topline s proizvodnom pogonom.

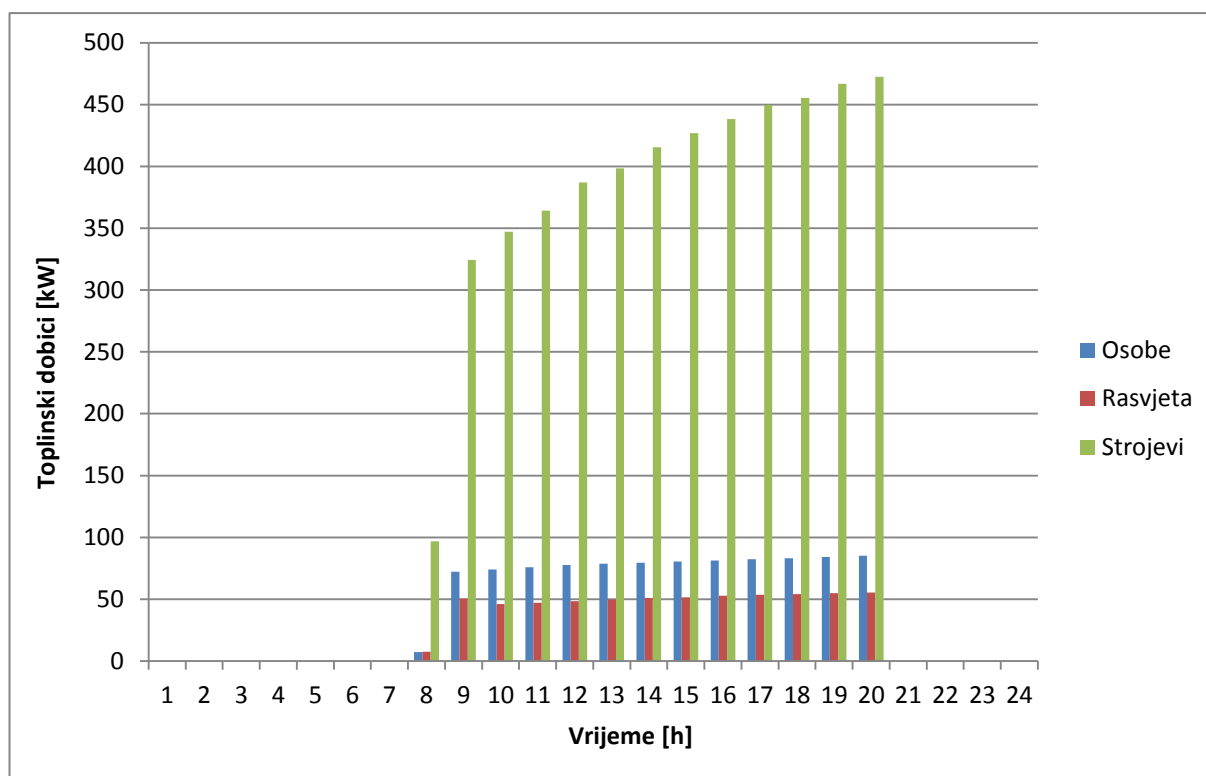
Površine koje su ozračene Suncem također utječu na sveukupnu bilancu hlađenja, a to su svi vanjski zidovi, prozori i ravni krov. Kroz zidove i krov dobici topline ostvaruju se transmisijom (provođenjem). Kroz prozore toplinski dobici ostvaruju se transmisijom i zračenjem. Vrijednosti koeficijenata prolaza topline za prozore su dobiveni računanjem prema jednadžbi (2.12.) i oni iznose 4,9 W/m<sup>2</sup>K za kopelit staklo debljine 30 mm i toplinske vodljivost 0,8 W/mK [8], dok vrijednost za pleksiglas debljine 10 milimetara i toplinske vodljivosti 0,2 W/mK [6] iznosi 4,6 W/m<sup>2</sup>K. Koeficijent prolaza topline za ravni betonski krov debljine 0,2 metara izoliran bitumenskom trakom iznosi 2,7 W/m<sup>2</sup>K [7], a za betonske zidove debljine 0,4 metara iznosi 2,44 W/m<sup>2</sup>K [7]. Prozori su s unutarnje strane zakriveni tamnim platnenim zavjesama koje sprečavaju direktan upad sunčeva zračenja u proizvodni pogon. Ukupni transmisijski koeficijent solarnog zračenja,  $b$ , koji se uzima u obzir kod ostakljenih površina u ovom slučaju jednak je umnošku transmisijskog koeficijenta samog stakla i transmisijskog koeficijenta unutarnje zaštite prozora (zavjesa). Za kopelit staklo uzeta je vrijednost kao i za obično staklo, te ona iznosi 0,85. [4] Za tamnu platnenu zaštitu ona iznosi 0,9. [4] Njihov umnožak daje vrijednost od 0,765. Ukupni transmisijski koeficijent solarnog zračenja za pleksiglas iznosi 0,7. [6]

Ventilacija proizvodnog pogona se obavlja uz pomoć centrifugalnog ventilatora i kanalnog razvoda. Kanali su smješteni pod strop, pravokutnog su poprečnog presjeka, a materijal njihove izrade je pocinčani lim. Ventilator je, kako je to već prije opisano, smješten u prizemlju tvorničkog objekta, a pokretan je elektromotorom. Pri broju okretaja 370 min<sup>-1</sup> postiže volumni protok zraka od 6500 m<sup>3</sup>/h za radnu

temperaturu 20 °C. Godina proizvodnje je 1972., a proizvođač tvornica *Unioninvest* iz Sarajeva.

Na temelju izračunatog ukupnog volumena proizvodnog pogona na prvom katu u iznosu od 32700 m<sup>3</sup> i nazivnog volumnog protoka zraka ventilatora, njihovim međusobnim dijeljenjem se dolazi do broja izmjena zraka po satu. On iznosi 0,2; ali pošto je tehničkim propisom određeno da broj izmjena unutarnjeg zraka s vanjskim zrakom kod zgrada u kojima borave ili rade ljudi mora iznositi minimalno 0,5 [5]; ta vrijednost je korištena u proračunu toplinskog opterećenja u *IntegraCad* - u. Ventilacijski sustav koji je trenutno instaliran nema ugrađen sustav rekuperacije topline.

### 3.4.1. Analiza rezultata toplinskog opterećenja prema VDI 2078



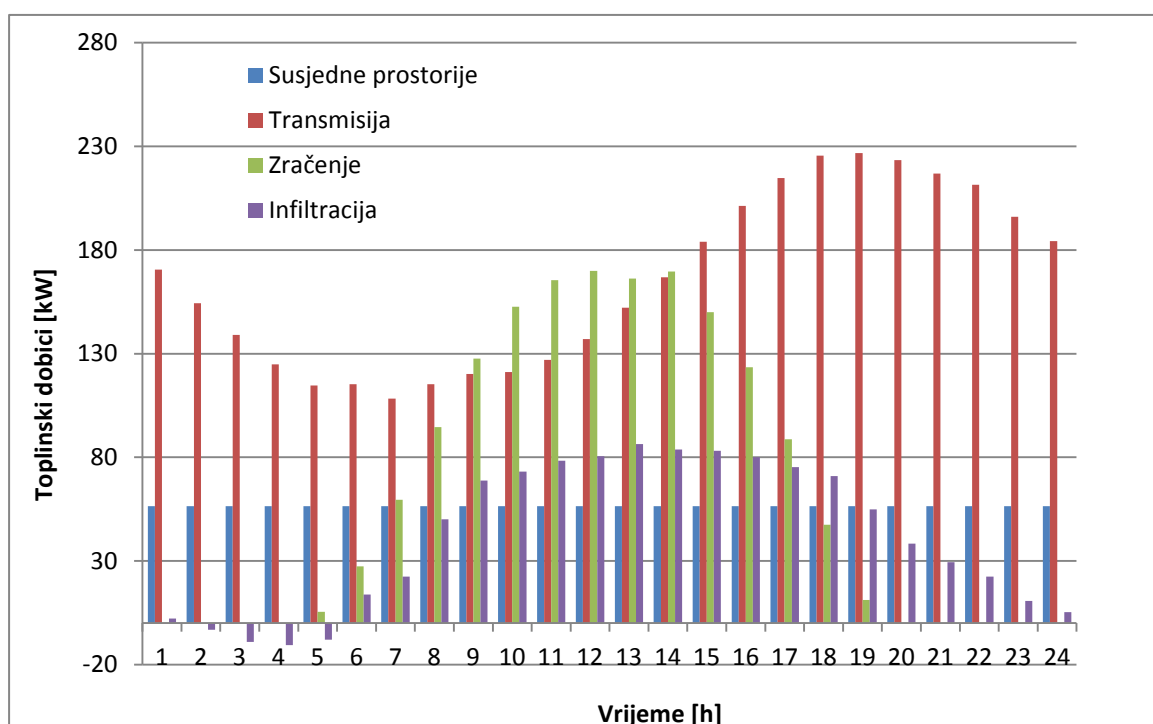
Slika 3.9. Grafički prikaz toplinskih dobitaka proizvodnog pogona od unutarnjih izvora topline za svaki sat, mjesec srpanj

Slikom 3.9. grafički su prikazani toplinski dobici od strane unutarnjih izvora topline proizvodnog pogona. Najveći udio kod toplinskih dobitaka od unutarnjih izvora topline imaju instalirani strojevi koji su u pogonu tokom čitavog radnog vremena – od 8 do 20 sati. U 8 sati, neposredno nakon uključivanja, toplinski dobici od strojeva iznose 96,8 kW. Nakon što svi strojevi postignu svoju radnu temperaturu, u 9 sati je primjetan nagli skok toplinskog dobitka, te iznosi 324,4 kW. Kao što se može vidjeti, za svaki sljedeći sat iznos toplinskog dobitka od strojeva raste. To se pripisuje matematičkom modelu prema kojem program *IntegraCad* radi. Program je pisan prema CLTD (engl. Cooling Load Temperature Difference) metodi proračuna toplinskog opterećenja. Konkretno, za slučaj toplinskih dobitaka od strojeva, nakon što se snaga elektromotora ili električnih grijača pomnoži sa srednjim stupnjem djelovanja, stupnjem opterećenja u dotičnom vremenu, faktorom istovremenosti i faktorom rashladnog opterećenja. Faktor istovremenosti i stupanj opterećenja su jednaki jedinici tokom svih 12 sati rada. Ono što se mijenja je faktor rashladnog opterećenja.

Njegova vrijednost raste sa svakim sljedećim satom kako su strojevi uključeni. Prikaz tih faktora dan je u tablici 30. [Galaso – Određivanje toplinskog opterećenja prostorije]. Najveća vrijednost toplinskog dobitka od strojeva postiže se na kraju radnog vremena, u 20 sati, te iznosi 472,4 kW.

Toplinski dobici od rasvjete i osoba se računaju na isti način kao prethodno opisani toplinski dobitak od strojeva. Ukupno instalirana snaga rasvjete se množi s faktorom upotrebe rasvjete u dotičnom vremenu (odnos uključene prema ukupno instaliranoj rasvjeti) – iznosi 1 i stupnjem opterećenja prostora od rasvjete. Za rasvjetu koja je izvedena bez odsisavanja zraka taj stupanj opterećenja iznosi 1. [4] Raspon vrijednosti faktora rashladnog opterećenja za toplinski dobitak od rasvjete dan je u tablicama 21. – 25. [Galaso - Određivanje toplinskog opterećenja prostorije]. Raspon kretanja vrijednosti toplinskih dobitaka od rasvjete se kreće između 7,5 kW (8 sati) do 55,4 kW (20 sati).

Toplinski dobitak od osoba ujutro u 8 sati iznosi 7,4 kW, a na kraju radnog dana (u 20 sati) 85,1 kW. Raspon vrijednosti rashladnog opterećenja za toplinski dobitak od osoba prikazan je tablicom 27. [Galaso - Određivanje toplinskog opterećenja prostorije]



Slika 3.10. Grafički prikaz vanjskih toplinskih dobitaka za svaki sat, mjesec srpanj

Slika 3.10. daje grafički prikaz toplinskih dobitaka proizvodnog pogona od vanjskih izvora topline – Sunce.

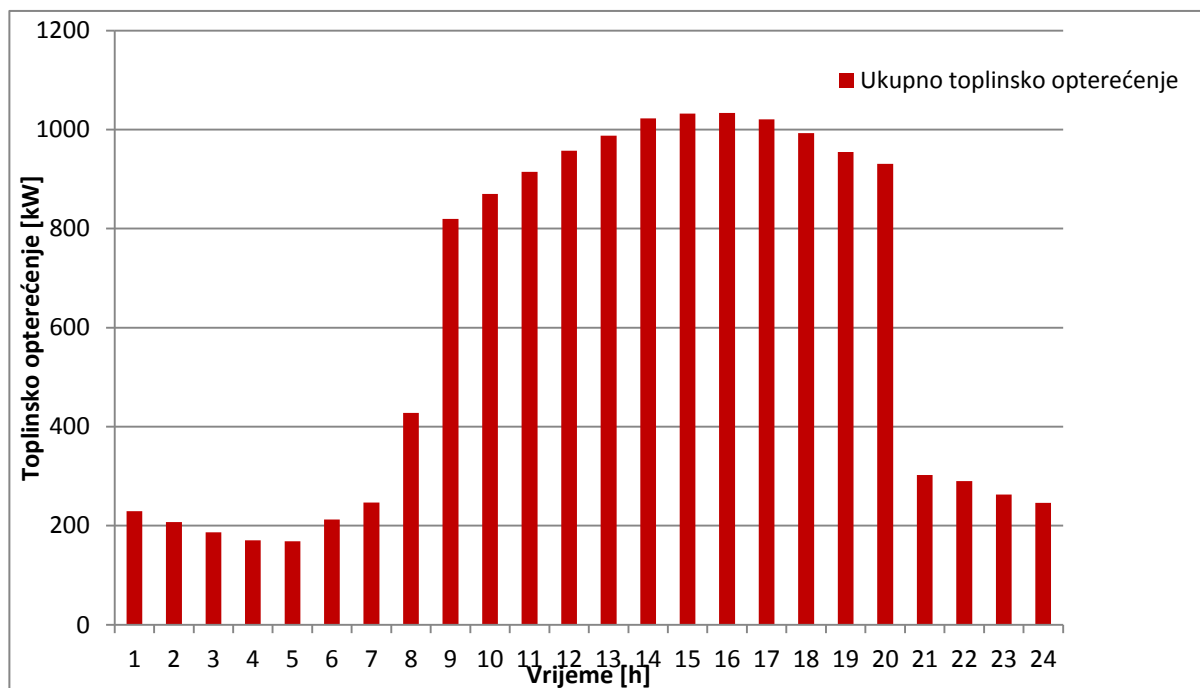
Toplinski dobitak od susjednih prostorija ne mijenja se i cijelo vrijeme je konstantan, te njegova vrijednost iznosi 56,4 kW.

Toplinski dobitak transmisijom preko prozora, zidova i krova ima vidljivo vremensko kašnjenje u odnosu na pojavu maksimalne vrijednosti temperature vanjskog zraka. Iz slike 3.7. vidljivo je da se temperaturni maksimum postiže u 13 sati, a maksimalni toplinski dobitak transmisijom se ostvaruje u 19 sati – što je vremenski pomak od 6 sati. Objašnjenje ove pojave vremenskog kašnjenja nalazi se u samoj konstrukciji objekta. Naime, zidovi, prozori i krov imaju svoju masu koja predstavlja svojevrсни toplinski spremnik – akumulator topline. Kao što se vidi iz slike 3.9. najmanja vrijednost toplinskog dobitka transmisijom je u 7 sati ujutro. S odmicanjem dana Sunce sve više zagrijava i progrijava gradbene elemente objekta i njihova temperatura raste. Raste i temperaturna razlika između zraka unutar proizvodnog pogona i tih elemenata. Toplinski dobitak transmisijom u 19 sati iznosi 226,8 kW. Nakon 19 sati, dobitak transmisijom se postepeno smanjuje sve do 7 sati ujutro.

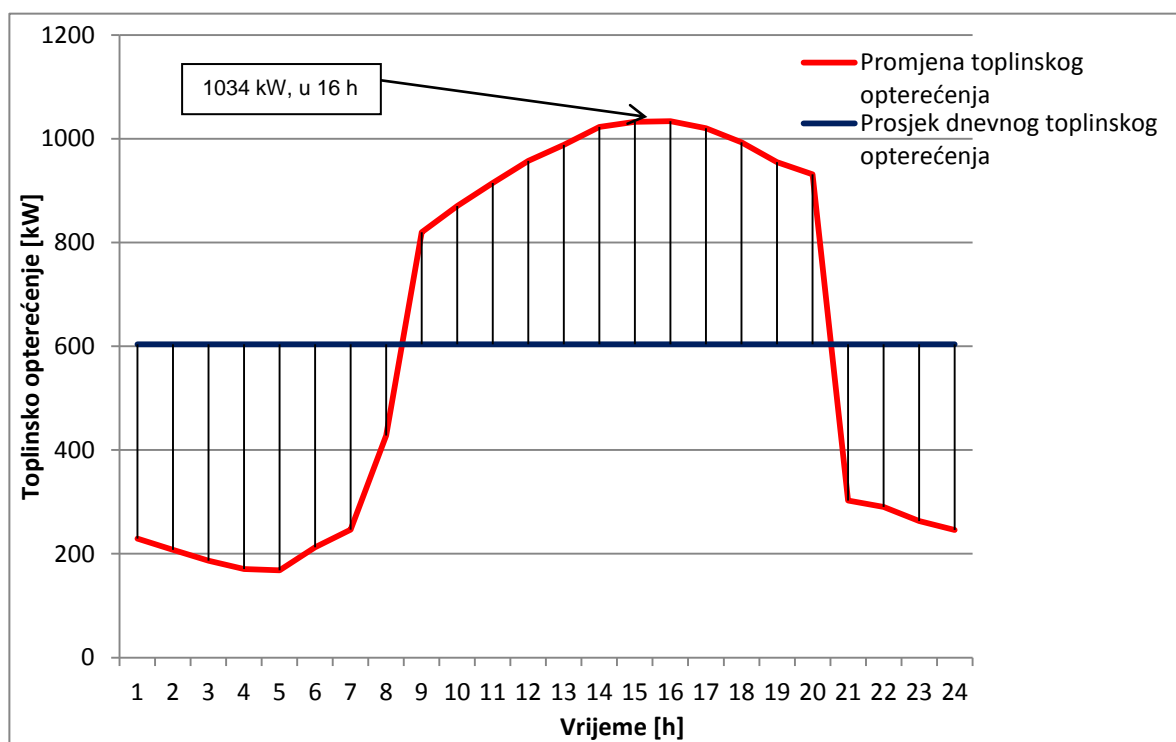
Toplinski dobitak zračenjem je direktno povezan s položajem Sunca tokom dana. Od 20 sati navečer, pa do 5 sati ujutro taj dobitak iznosi nula. Sa izlaskom Sunca u 5 sati ujutro javlja se dobitak zračenjem u iznosu od 5,4 kW; a vrhunac zračenja se postiže u 14 sati sa 169,6 kW.

Ventilacija – infiltracija predstavlja onu količinu vanjskog zraka koja ulazi u proizvodni pogon djelomično preko centrifugalnog ventilatora, a djelomično preko zazora na prozorima, vratima itd. Iznos toplinskog dobitka infiltracijom poprima negativne vrijednosti između 2 i 5 sati ujutro zbog toga što vanjska temperatura zraka pada ispod vrijednosti od 25 °C. Tokom ostalih sati dobitak infiltracijom je pozitivan i najveća vrijednost je u 13 sati (najveća temperatura vanjskog zraka) od 86,4 kW.





Slika 3.11. Toplinsko opterećenje proizvodnog pogona za svaki sat u mjesecu srpnju



Slika 3.12. Toplinsko opterećenje proizvodnog pogona za svaki sat i prosjek dnevnog toplinskog opterećenja za mjesec srpanj

Sveukupno toplinsko opterećenje, kao zbroj unutarnjih i vanjskih toplinskih dobitaka sa slika 3.9. i 3.10. proizvodnog pogona za mjesec srpanj, postiže svoj maksimum u 16 sati, te iznosi 1034 kW. Primjećuje se da i ovdje postoji vremensko kašnjenje u odnosu na intenzitet sunčeva zračenja. Sunčevo zračenje koje dolazi na prozorsko staklo jednim svojim dijelom se reflektira natrag u okoliš, a dio prolazi kroz staklo u prostoriju. Zagrijano staklo oslobađa konvektivnu toplinu prema okolišu i prema prostoru. Dio zračenje koji je prošao kroz staklo zagrijava okolne zidove, pod, strop, namještaj, strojeve, opremu itd., a dio se reflektira od podloge. Od svih tih zagrijanih elemenata se toplina, s izvjesnim kašnjenjem, oslobađa u prostor konvekcijom i zračenjem. Dnevni prosjek toplinskog opterećenja iznosi 604 kW, što je za 1,7 puta manje od maksimalnog toplinskog opterećenja u 16 sati, slika 3.12.

U tablici 3.2. i 3.3. prikazana su toplinska opterećenja proizvodnog pogona i za ostale mjesece u godini za svaki sat. Tokom cijele godine će biti potrebno hlađenje, dok će od listopada do travnja prvih sat vremena od početka radne smjene biti potrebno grijanje.

Tablica 3.2. Toplinsko opterećenje proizvodnog pogona u kilovatima [kW] od siječnja do kolovoza, za svaki sat.

Sat/mjesec	Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj	Kolovoz
0	-58,1	-50,3	-8	3,4	63,9	102,4	132,6
1	-70,3	-62,5	-21,7	-10,3	50,2	87,7	119,8
2	-84,5	-76,7	-35	-23,5	35,4	72	105,1
3	-96,4	-89,1	-47,8	-36,4	21,6	58,6	91,7
4	-110,2	-102,4	-62,6	-51,2	6,3	43,8	76,9
5	-123,1	-115,3	-75	-63,5	1,7	42,9	62,6
6	-135,5	-128,1	-88,3	-76,9	16,7	56,4	65,6
7	-147,8	-140	-99,2	-87,8	41,7	79,6	87,5
8	-181,3	-164,4	-102,8	-91,4	122	174,5	187,6
9	154,2	172,2	234,7	246,2	497,2	548,8	563,3
10	180,2	200,2	264,8	276,3	555,3	605,1	624,2
11	196	233,6	300,3	311,7	603,8	652,2	678,2
12	245	280,7	345,3	356,7	655,9	702,9	735

13	275,6	317,2	382,9	394,3	700,6	737,8	775,8
14	315,1	358,8	425,5	436,9	741,5	790,7	812,7
15	347,6	390,3	460,1	471,6	756,2	808,6	824,5
16	375,1	416,8	489,7	501,1	762,1	815,6	827,7
17	318,6	355,1	432,1	443,6	669,2	727,6	735,1
18	333,1	363,4	440,4	451,9	637,7	698,5	701,5
19	350,1	378,6	451,4	462,9	608	672,2	686,5
20	-35	-23,7	21,1	32,5	104,9	146,9	173,6
21	-37,3	-27,9	15,8	27,2	97,7	137,2	165,3
22	-40,1	-30,8	12,5	23,9	90,9	130	158,5
23	-49,4	-40,5	1,7	13,1	77,1	116,7	145,3

Tablica 3.3. Toplinsko opterećenje proizvodnog pogona u kilovatima [kW] od rujna do prosinca, za svaki sat.

Sat/mjesec	Rujan	Listopad	Studeni	Prosinac
0	96	50,3	-28,7	-61,3
1	83,3	38,5	-40,5	-72,6
2	68	24,3	-53,7	-86,3
3	55,2	11,9	-66,1	-98,2
4	39,4	-1,9	-79,9	-112
5	27,1	-14,2	-92,7	-123,8
6	14,9	-26,6	-105,1	-136,2
7	27	-37,9	-116,9	-148,1
8	106,5	-12,8	-122	-175
9	481,9	323,8	211,4	157,5
10	545,1	350,7	237,4	182,4
11	601,7	385,2	268,7	210,6
12	661,2	429,1	310,6	250,4
13	698,9	463,6	341	279,8
14	727,6	503,2	379,5	316,2
15	732,7	534,7	410	345,7

16	731,5	563,2	439,5	374,2
17	635,4	504,6	383	317,7
18	611,4	513,9	397,5	333,2
19	621,6	529,1	415,8	351,5
20	131,6	78,3	-4,1	-40,2
21	125,3	74,1	-6,9	-42
22	120,5	71,3	-8,7	-43,3
23	108,2	61	-19	-52,6

S obzirom da će u nastavku biti analizirana potrošnja električne energije i pogonski troškovi pogona rashladnika vode za svaki mjesec u godini u vremenskom razdoblju od 8 do 20 sati, stoga će u tablici 3.4. za to isto vremensko razdoblje biti navedena potreba za rashladnom energijom.

Tablica 3.4. Potreba za rashladnom energijom za svaki mjesec u godini

<b>Mjesec</b>	<b>Potreba za rashladnom energijom [kWh]</b>
Siječanj	83459,7
Veljača	83210,4
Ožujak	114142,5
Travanj	113185,8
Svibanj	197361,9
Lipanj	206297
Srpanj	297972
Kolovoz	220109,4
Rujan	186043
Listopad	137732,4

Studen	98659,6
Prosinac	84218,4
<b>Ukupno</b>	<b>1822392,1</b>

## **4. Energetsko - ekonomska analiza isplativosti rashladnog postrojenja s akumulacijom rashladnog učinka u odnosu na sustav bez akumulacije**

### **4.1. Općenito o akumulaciji rashladne energije**

U današnje doba, kada je imperativ štednja energije i očuvanje okoliša, sve se više razmišlja o tome kako iz uložene energije izvući maksimum. Prema procjenama (UNEP 2003.) unutar razvijenih zemalja oko 20% ukupne potrošnje električne energije se troši na sustave klimatizacije u području zgradarstva, a čak 50% vršnog opterećenje elektro – distributivnog se pripisuje radu klimatizacijske opreme u najtoplijem dijelu godine. [17] To može često dovesti do kvarova i problema s isporukom električne energije prema drugim potrošačima.

S ciljem rješavanja navedenih problema, kao jedno od mogućih rješenja je skladištenje rashladne energije za vrijeme manjeg toplinskog opterećenja hlađenog objekta ili prostorije (navečer, rano ujutro) i za vrijeme niže tarfie kad je električna energija jeftinija. Osim što će se kod izvedbe ovakve vrste rashladnog postrojenja postići niži pogonski troškovi, zbog smanjenja kapaciteta rashladnog uređaja postići će se i niži investicijski troškovi. Manji kapacitet rashladnog uređaja za sobom povlači i njegove manje gabaritne dimenzije, pa će se uštedjeti na korisnom prostoru unutar same strojarnice. Da bismo opravdali uvođenje rashladnog postrojenja s akumulacijom rashladnog učinka, bitno je sljedeće:

- da je cijena zakupa energije visoka
- postojanje više i niže tarfie (VT i NT) obračunavanja potrošnje el. energije
- da je vršno toplinsko opterećenje hlađenog objekta/prostorije veće nego prosječno toplinsko opterećenje
- da toplinsko opterećenje nije u fazi s vremenom dostupnosti energije
- da se pojavljuju vrlo visoka kratkotrajna toplinska opterećenja
- da se ne smije dozvoliti prekid u isporuci rashladne energije prema potrošačima u slučaju nestanka električne energije (npr. bolnice)

Akumulirani rashladni učinak se, u za to predviđene rezervoare (spremnike), pohranjuje u formi leda ili kao hladna voda. Ovisno o temperaturnim režimima sustava hlađenja i klimatizacije određuje se hoće li to biti led ili hladna voda. Tamo

gdje je temperatura hlađenja niža od 0 °C koristit će se spremnici s ledom, takozvane banke leda. Prednost spremnika s ledom u odnosu na spremnik hladne vode je u njegovoj veličini. Zbog specifične topline taljenja leda  $c_L = 334 \text{ kJ/kg}$ , spremnik s ledom je puno manjeg volumena, odnosno ima manje gabaritne mjere što ponekad puno znači kad smo ograničeni sa prostorom za njegov smještaj. Ipak, najviše se koriste sustavi sa spremnikom hladne vode. [16] To je iz razloga što postoji mogućnost korištenja već instaliranih rashladnika vode, distribucijske mreže i izmjenjivača topline unutar ventilokonvektora. U tablici 4.1. prikazane su tri najčešće izvedbe akumulacije rashladnog učinka, navedeni su temperaturni režimi, te prednosti i nedostaci.

Tablica 4.1. Karakteristike sustava akumulacije rashladnog učinka [16]

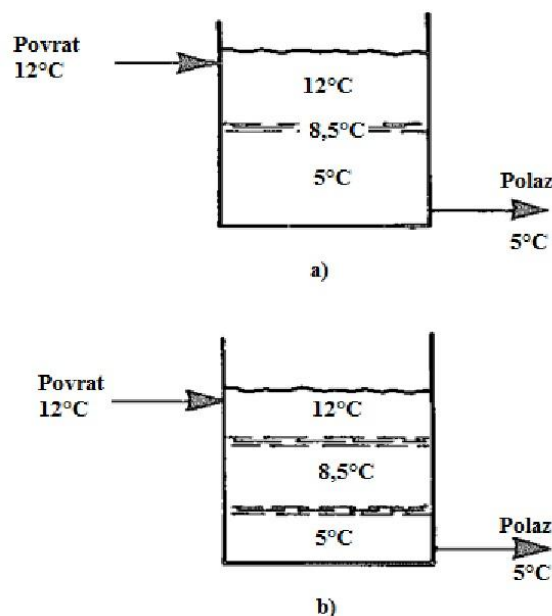
Sustav	Gustoća akumulacije energije [kWh/m <sup>3</sup> ]	Temperaturni režim pri punjenju [°C]	Temperaturni režim pri pražnjenju [°C]	Prednosti	Nedostaci
Banka leda s ledom formiranim oko cijevi	40 do 50	-3 do -10	1 do 2	Stabilna izlazna temperatura vode, veliki rashladni učinak za vrijeme pražnjenja	Kontrola količine leda prisutne u spremniku
Banka leda s ledom u zatvorenim spremnicima	30 do 40	-3 do -6	1 do 3	Kontrola količine leda prisutne u spremniku	Manja gustoća akumulacije rashladne energije i slab prijelaz topline kod pražnjenja i punjenja
Vodeni sustavi	60 do 11	4 do 6	5 do 8	Korištenje postojećih rashladnika vode, veliki faktor hlađenja rashladnika pri punjenju	Mala gustoća akumulacije rashladne energije

Ovisno o temperaturnoj razlici između polaza i povrata rashladne vode, ovisit će i volumen spremnika u koji se pohranjuje. Za temperaturnu razliku od 11 °C minimalni volumen vode je 0,086 m<sup>3</sup>/kWh, dok on za temperaturnu razliku od 17 °C iznosi 0,056 m<sup>3</sup>/kWh. [16] Dolazi se do zaključka da je za istu količinu pohranjene rashladne energije kod veće temperaturne razlike potreban manji volumen vode. Kod akumulacije hladne vode unutar spremnika važno je da ne dođe do miješanja slojeva tople i hladne vode. Raslojavanje je moguće ostvariti prirodnim uzgonom tople vode u odnosu na hladniju, sustavom labirinata unutar spremnika, povezivanje više spremnika u jedan sustav, membranom itd. [16]

Kod spremnika gdje se raslojavanje toplog i hladnog sloja vode odvija prirodnim putem, vrlo bitno je strujanje vode unutar spremnika. To strujanje ne smije biti turbulentno, nego laminarno. Toplija voda se vraća preko difuzora s gornje strane spremnika. Kako se spremnik puni toplijom vodom, tako ona poput stapa potiskuje prema dolje hladniji sloj odakle se crpi hladna voda. Između sloja tople i hladne vode stvorit će se pojas koji se naziva *termoklina* (engl. *termocline*) unutar kojeg se javlja vertikalni temperaturni gradijent. Unutar tog sloja temperatura vode se kreće u rasponu od maksimalne ulazne do minimalne izlazne. Teži se ka tome da pojas termokline bude što tanji kako bi korisni kapacitet hladne vode bio što veći. Kod dobro isprojektiranih akumulacijskih spremnika, sloj termokline iznosi od 0,3 do 1 metar. Ako se spremnik dobro isprojektira, on može dati 85 do 95% akumulirane rashladne energije. [19]

Na slici 4.1. u presjeku je kvalitativno prikazana raspodjela toplog i hladnog sloja vode s pojasom termokline. Prikazana su dva slučaja – gornji (pod a) kakav se želi postići u praksi zbog tankog pojasa termokline i donji (pod b) koji svakako treba izbjegavati jer se gubi korisni kapacitet hladne vode.





Slika 4.1. Temperaturna stratifikacija vode u akumulacijskim spremnicima: [18]

a) dobra stratifikacija (tanki pojas termokline)

b) loša stratifikacija (debeli pojas termokline)

#### 4.2. Analiza cilindričnog spremnika pri procesu punjenja i pražnjenja rashladnom energijom

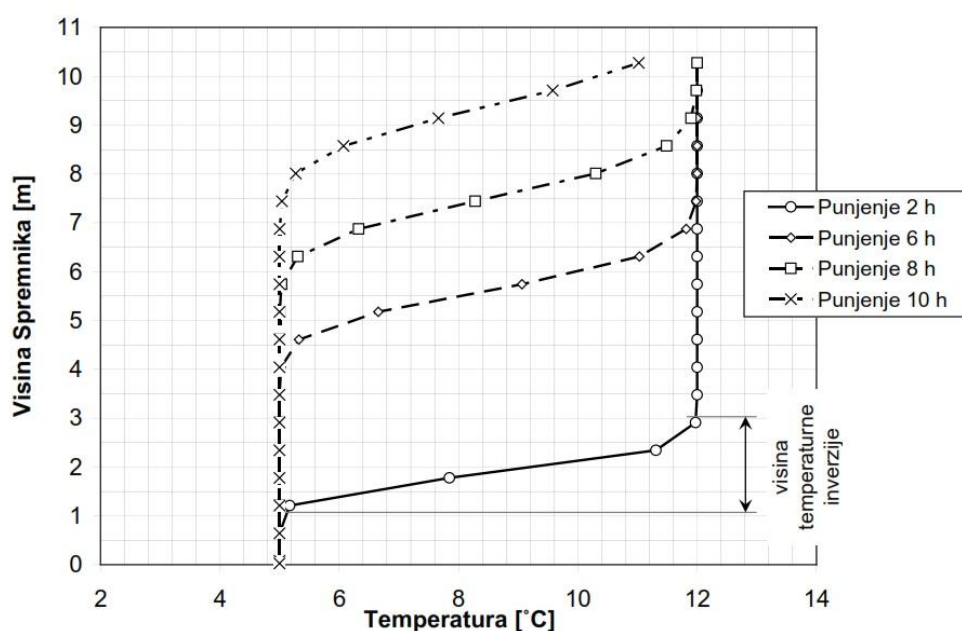
Prije daljnje analiza, na početku će ukratko biti objašnjeni pojmovi punjenja i pražnjenja akumulacijskog spremnika.

Punjenje – odvija se kad je toplinsko opterećenje objekta manje od rashladnog učinka rashladnika. Najbolje vrijeme za ovu fazu je u periodu nižeg tarifnog obračunskog razdoblja potrošnje električne energije. Preko difuzora s donje strane spremnika se hladna voda u njega uvodi, a s gornje strane se odvodi, isto preko difuzora. S trajanjem punjenja, spremnik se sve više puni hladnom vodom čiji sloj raste, a sloj tople vode se smanjuje. Formira se pojas termokline koja ta dva sloja odjeljuje. Za vrijeme ovog procesa razina vode u spremniku ostaje konstantna.

Pražnjenje – odvija se kad nastupa maksimalno toplinsko opterećenje objekta. S donje strane spremnika se voda preko difuzora odvodi, a s gornje strane dovodi topla

voda iz hlađenog objekta. Također i ovdje razina vode u spremniku ostaje konstantna.

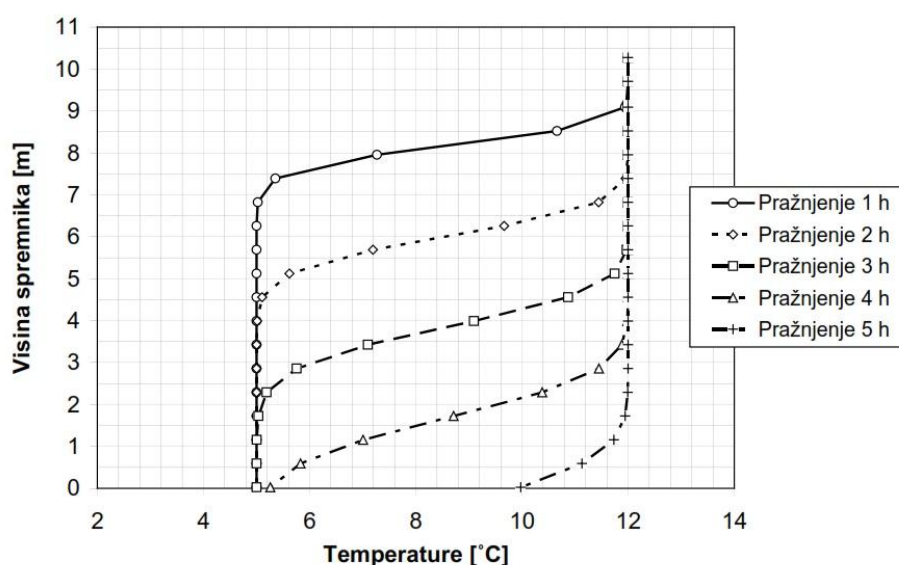
Kao primjer poslužit će cilindrični spremnik, volumena  $3400 \text{ m}^3$ , ukupne visine 10,5 metara i početne temperature vode u spremniku  $12^\circ\text{C}$  za slučaj punjenja, odnosno  $5^\circ\text{C}$  za slučaj pražnjenja. Volumni protok hladne vode kojom se spremnik puni iznosi  $300 \text{ m}^3/\text{h}$ . [16] Na slici 4.2. prikazan je temperaturni profil vode po visini spremnika koji se mijenja s vremenom za slučaj punjenja spremnika. Također je jasno vidljiv profil temperature unutar pojasa termokline čiji nagib raste s trajanjem procesa punjenja. Nakon 2 sata punjenja taj nagib iznosi oko 2 metara, da bi nakon 10 sati taj nagib iznosio oko 3 metara. Zbog toga što se u pojasu termokline temperaturni profil brzo mijenja – raste, taj pojas pomiješane vode je gubitak akumuliranog rashladnog učinka.



Slika 4.2. Temperaturni profil vode u zavisnosti o vremenu trajanja punjenja i visini spremnika [16]

Slikom 4.3. prikazan je temperaturni profil vode po visini spremnika koji se mijenja s vremenom za slučaj pražnjenja spremnika. Hladna voda se s donje strane

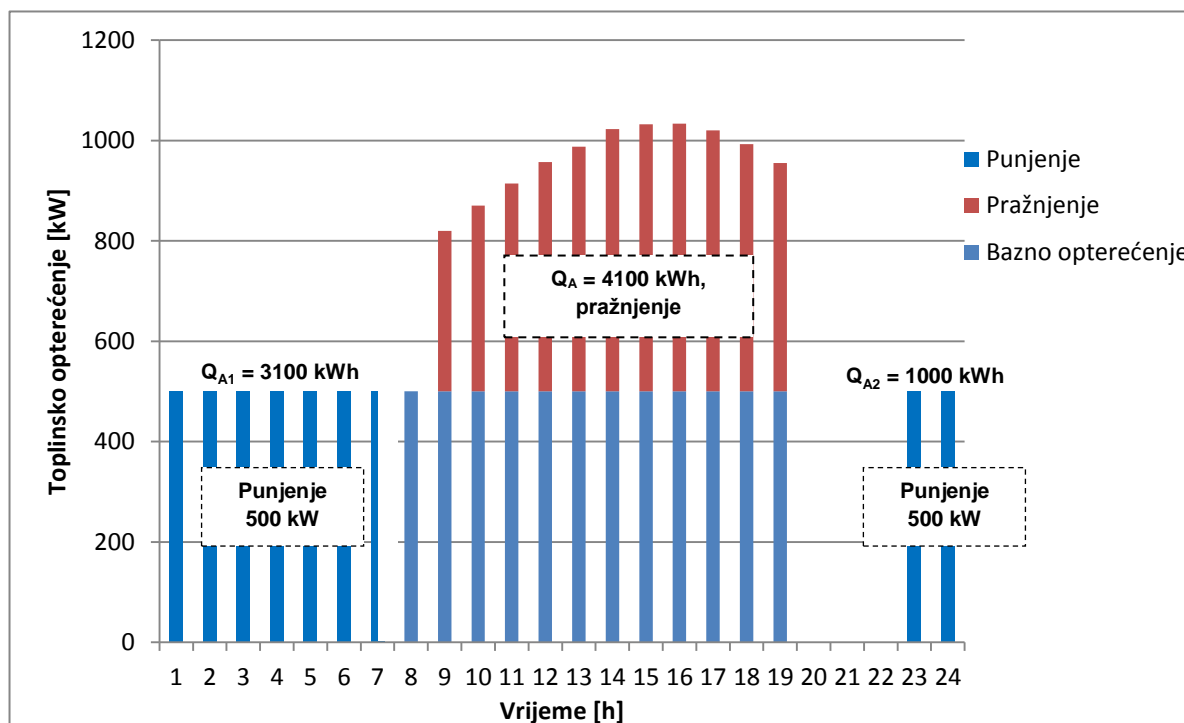
spremnika, preko difuzora, uzima i crpi dalje u sistem rashladnog sustava objekta. Volumni protok hladne vode kojom se spremnik prazni iznosi  $720 \text{ m}^3/\text{h}$ . Upravo zbog većeg protoka kojim se spremnik prazni, visina pojasa termokline je veća nego kod procesa punjenja. Za vrijeme pražnjenja osigurana je konstantna temperatura polaza hladne vode u trajanju od četiri sata. Nakon pet sati pražnjenja, temperatura polaza hladne vode porasla je s pet na deset stupnjeva Celzijusa. Spremnik se smatra praznim kad temperatura vode na polazu postigne vrijednost od  $7^\circ\text{C}$ .



Slika 4.3. Temperaturni profil vode u zavisnosti o vremenu trajanja pražnjenja i visini spremnika [16]

#### 4.3. Potrošnja energije i pogonski troškovi rashladnog postrojenja s akumulacijom rashladnog učinka

Kao što je već ranije u prethodnom poglavlju detaljno opisano, dolazi se do zaključka da je toplinsko opterećenje proizvodnog pogona tvornice obuča dinamično tokom dana. Primjenom direktnih sustava hlađenja u takvim uvjetima eksploatacije, dovelo bi do toga da rashladnici vode ne bi radili s konstantnim rashladnim učinkom. Većinu vremena bi radili s djelomičnim opterećenjem što posljedično za sebe ima i promjenu faktora hlađenja, odnosno povećanje/smanjenje potrošnje pogonske energije. U ovom radu se pod pogonsku smatra električna energija. Cijena električne energije se razlikuje ovisno o dobu dana. S obzirom da se tvornica obuča nalazi u Federaciji Bosne i Hercegovine, koristit će se cijene električne energije koje vrijede za tu državu. Isključivo za ovaj diplomski rad cijene će biti preračunate u Hrvatske kune (HRK) radi pojednostavljenja. Cijena niže tarife (NT) za industriju iznosi 0,23 kn/kWh, dok cijena više tarife (VT) iznosi 0,47 kn/kWh. Cijena mjesečnog zakupa električne snage iznosi 82 kn/kW. Cijene električne energije se primjenjuju od 1.1.2015. godine. Za vrijeme ljetnog računanja vremena niža tarifa se obračunava od 23 do 8 sati, od ponedjeljka do petka. Subotom i nedjeljom se primjenjuje cijeli dan. [20]



Slika 4.4. Podjela dnevnog toka toplinskog opterećenja proizvodnog pogona na bazno i vršno

Grafikon na slici 4.4. prikazuje podjelu toplinskog opterećenja proizvodnog pogona na bazno i vršno u razdoblju od 8 do 20 sati. U tom periodu ljudi borave unutar tog pogona i potrebno je hlađenje. Kao bazno toplinsko opterećenje uzeta je vrijednost od 500 kW što je za oko 2,1 puta manje nego maksimalno toplinsko opterećenje koje se javlja u 16 sati. Za pokrivanje baznog toplinskog opterećenja odabran je rashladnik vode čiji učin hlađenja iznosi 500 kW. Uspoređujući grafikone na slikama XXX i 4.4. vidi se da je toplinsko opterećenje u periodu između 8 i 9 sati manje nego bazno, što znači da će se sva potrebna rashladna energija u tom razdoblju moći namaknuti iz rashladnika vode. Tokom ostalog intervala hlađenja, od 9 do 20 sati, razlika između maksimalnog toplinskog opterećenja za svaki sat i baznog toplinskog opterećenja (u dijagramu naznačeno crvenom bojom) nadoknađuje se akumuliranom rashladnom energijom iz spremnika. Rashladna energija se akumulira unutar spremnika u vremenu kad je jeftinija električna energija – niža tarifa (NT), te kad unutar proizvodnog pogona ne borave ljudi. Za akumulaciju služi isti rashladnik vode kojim se pokriva bazno toplinsko opterećenje. Iz grafikona na slici 4.4. proizlazi da je potrebno unutar spremnika akumulirati 5100 kWh rashladne energije. S navedenim rashladnikom vode, punjenje akumulacijskog spremnika će trajati 10 sati i 15 minuta, od 21 do 7 i 15.

Vrijeme punjenja akumulacijskog spremnika:

$$t = \frac{Q_A}{\Phi_0} \quad (4.1)$$

$$t = \frac{5100}{500} = 10,2h$$

Površina u grafikonu na slici 4.4. označena crvenom bojom mora biti jednaka zbroju površina označenih tamnoplavom bojom, odnosno vrijedi:

$$Q_A = Q_{A1} + Q_{A2} \quad (4.2)$$

$$Q_A = 3600 + 1500 = 5100 kWh$$

Za rashladnik vode koji će pokrivati bazno toplinsko opterećenje tokom dana i akumulirati rashladnu energiju tokom noći, odabran je proizvođač »Daikin« - model

EWAD500TZSS. Njegov nazivni učin hlađenja iznosi  $\Phi_0 = 500$  kW, faktor hlađenja EER iznosi 2,8; a električna snaga za pogon kompresora  $P_{el} = 178$  kW.

Punjenje spremnika rashladnom energijom traje 10 sati i 15 minuta (od 21 do 7 i 15 h). Obračun potrošnje električne energije po nižoj tarifi u ljetnom periodu počinje od 23 sata. Tvornica obučuje radi šest dana u tjednu, s naglaskom da se tokom subote potrošnja električne energije cijeli dan računa prema nižoj tarifi.

Tablica 4.2. Potrošnja električne energije i troškovi pogona kompresora rashladnika vode s akumulacijom rashladnog učinka, za mjesec srpanj.

	Potrošnja električne energije [kWh]	Trošak električne energije pri nižoj tarifi [kn]	Trošak električne energije pri višoj tarifi [kn]	Ukupni trošak za električnu energiju (pogonski troškovi) [kn]
Bazno toplinsko opterećenje	57627	1965	23090	25055
Akumulacija	49021	9392	3848	13240
<b>Rekapitulacija</b>	97036	11029	23090	<b>38295</b>

Analizom dobivenih rezultata u tablici 4.2. vidi se da na pokrivanje baznog toplinskog opterećenja otpada gotovo 74% ukupnih pogonskih troškova. Ukupni pogonski troškovi za ovakvu izvedbu sustava hlađenja iznose nešto malo manje od 34 119 kuna.

Iz tablica 3.2. i 3.3. vidi se da spremnik rashladnog učinka može biti u funkciji od svibnja do listopada, jer su dnevni maksimumi toplinskog opterećenja za te mjesece veći od rashladnog učina rashladnika vode kojim se pokriva bazno opterećenje od 500 kW, no međutim zbog opravdanja investicije, spremnik će biti u funkciji cijelu godinu. U periodu od svibnja do listopada razlika za potrebnim rashladnim učinkom će se pokrivati iz akumulacije, dok će se tokom ostalih mjeseci cijela dnevna potrebna rashladna energija akumulirati u noći, pa tokom dana kompresor rashladnika vode neće opće biti u pogonu.

Tablica 4.3. Potrošnja električne energije, u kilovatima [kW], za pogon kompresora rashladnika vode s akumulacijom rashladnog učinka od svibnja do listopada.

<b>Mjeseci/funkcija rashladnika vode</b>	<b>Bazno toplinsko opterećenje [kW]</b>	<b>Akumulacija [kW]</b>
Svibanj	57627	16254
Lipanj	55536	17487,6
Kolovoz	57627	19958,4
Rujan	55536	14502,8
Listopad	57627	1441,8

Tablica 4.4. Potrošnja električne energije, u kilovatima [kW], za pogon kompresora rashladnika vode s akumulacijom rashladnog učinka od studenog do travnja.

<b>Mjeseci/funkcija rashladnika vode</b>	<b>Akumulacija [kW]</b>
Studen	35126,5
Prosinac	29980
Siječanj	29710,7
Veljača	29622
Ožujak	40630
Travanj	40291

Tablica 4.5. Potrošnja električne energije i pogonski troškovi rashladnog postrojenja s akumulacijom rashladnog učinka za sve mjesece u godini.

<b>Mjesec</b>	<b>Potrošnja električne energije [kWh]</b>	<b>Pogonski troškovi [kn]</b>
Siječanj	29710,7	6833
Veljača	29622	6813
Ožujak	40630	9345
Travanj	40291	9267
Svibanj	73881	28793
Lipanj	73023,6	28073
Srpanj	97306	38295
Kolovoz	77585,4	29645
Rujan	70038,8	27387
Listopad	59068,8	25387
Studen	35126,5	8079
Prosinac	29980	6895
<b>Ukupno</b>	<b>656 264</b>	<b>224 812</b>

Ukupni godišnji pogonski troškovi za sustav s akumulacijom rashladnog učinka iznose **224 812** kuna.



#### 4.4. Potrošnja energije i pogonski troškovi rashladnog postrojenja bez akumulacije rashladnog učinka

Za slučaj rashladnog postrojenja bez akumulacije rashladnog učinka potrebno je odabrati rashladnik vode prema najvećem toplinskom opterećenju koje se javlja tokom godine, odnosno ljetnog perioda. U prethodnom poglavlju je napravljena detaljna analiza toplinskog opterećenja, te je ustanovljeno da se maksimum postiže u mjesecu srpnju u 16 sati i iznosi 1034 kW. Odabran je rashladnik vode proizvođača »Daikin« - model EWADC500TZSS čiji nazivni rashladni učin iznosi 1090 kW. Tokom dana rashladnik će samo jedno kraće vrijeme raditi pri najvećem opterećenju, dok će ostatak vremena raditi pod djelomičnim opterećenjem sukladno promjeni dinamike toplinskog opterećenja proizvodnog pogona. S promjenom opterećenja rashladnika vode, mijenjat će se i faktor hlađenja – on će rasti kako opterećenje pada. Od strane proizvođača rashladnika vode dani su podaci kako se mijenja faktor hlađenja o stupnju opterećenja, tablica 4.6.

Tablica 4.6. Stupanj opterećenja rashladnika vode i pripadajući faktor hlađenja, te električna snaga potrebna za pogon kompresora rashladnika.

Stupanj opterećenja rashladnika vode	Faktor hlađenja	Snaga za pogon kompresora rashladnika
25 %	COP = 4,5	$P_{el} = 55,5 \text{ kW}$
50 %	COP = 4,6	$P_{el} = 108,7 \text{ kW}$
75 %	COP = 3,8	$P_{el} = 197,4 \text{ kW}$
100 %	COP = 2,9	$P_{el} = 376 \text{ kW}$

Analizom svakog mjeseca u godini, dobivene su vrijednosti koliko vremenski rashladnik vode (trajanje u satima) radi pri opterećenjima od 25, 50, 75 i 100%.

U tablici 4.7. nalaze se vrijednosti o vremenskom trajanju pogona rashladnika vode pri određenom stupnju opterećenja, za svaki mjesec u godini.

Tablica 4.7. Stupanj opterećenja rashladnika vode i vremensko trajanje pogona.

	Trajanje pogona [h]			
<b>Mjesec/stupanj opterećenja</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>
Siječanj	108	189	0	0
Veljača	72	192	0	0
Ožujak	27	270	0	0
Travanj	26	234	26	0
Svibanj	27	27	216	54
Lipanj	26	0	208	78
Srpanj	0	27	0	297
Kolovoz	27	0	189	108
Rujan	26	26	260	0
Listopad	0	135	162	0
Studen	52	234	0	0
Prosinac	81	216	0	0
<b>Ukupno</b>	<b>472</b>	<b>1550</b>	<b>1061</b>	<b>537</b>

Nakon što su dobiveni podaci o trajanju pogona za svaki stupanj opterećenja, množenjem tih vrijednosti s pripadajućim vrijednostima o električnoj snazi za pogon kompresora iz tablice 4.6., dobiva se potrošnja električne energije. Potrošnja za svaki mjesec u godini prikazana je tablicom 4.8.

Tablica 4.8. Potrošnja električne energije za svaki mjesec u godini.

	Potrošnja električne energije [kWh]				<b>Ukupno [kWh]</b>
<b>Mjesec/stupanj opterećenja</b>	<b>25%</b>	<b>50%</b>	<b>75%</b>	<b>100%</b>	
Siječanj	5994	20544	0	0	26538
Veljača	3996	20870	0	0	24866
Ožujak	1499	29349	0	0	30848
Travanj	1443	25436	5132	0	32011

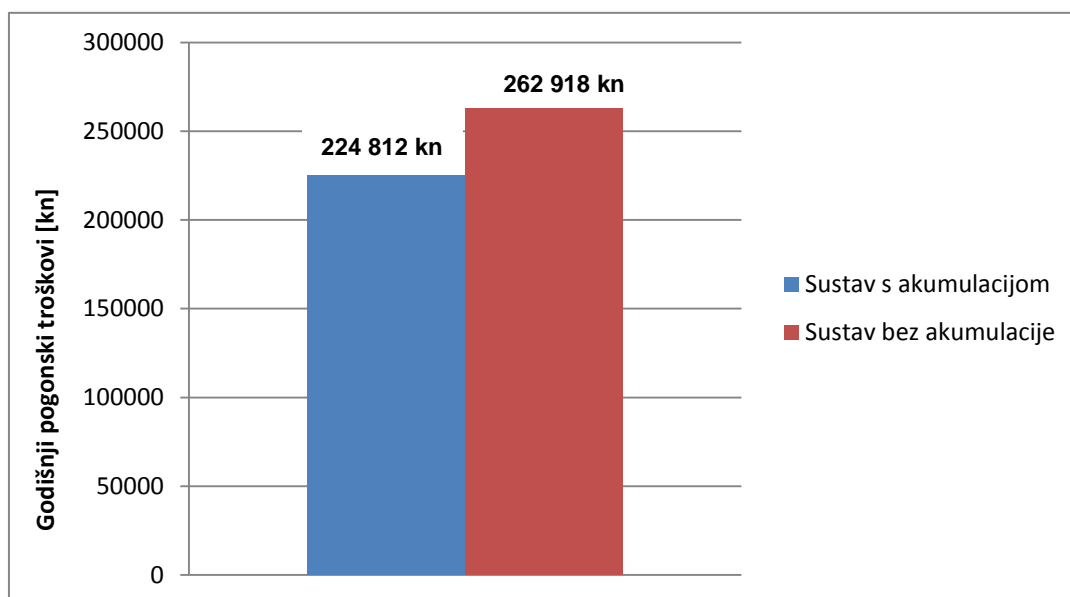
Svibanj	1499	2935	42638	20304	67376
Lipanj	1443	0	41059	29328	71830
Srpanj	0	2935	0	111672	114607
Kolovoz	1499	0	37309	40608	79416
Rujan	1443	2826	51324	0	55593
Listopad	0	14674	31979	0	46653
Studenj	2886	25436	0	0	28322
Prosinac	4495	23479	0	0	27974
					<b>606034</b>

Poznavajući cijene električne energije, kn/kWh, lako se dolazi do mjesečnih pogonskih troškova za sustav bez akumulacije rashladnog učinka, tablica 4.8.

Tablica 4.8. Pogonski troškovi za svaki mjesec u godini.

Mjesec/stupanj opterećenja	Pogonski troškovi [kn]				Ukupno [kn]
	25%	50%	75%	100%	
Siječanj	2603	8925	0	0	11528
Veljača	1718	8974	0	0	10692
Ožujak	651	12750	0	0	13401
Travanj	625	11016	2223	0	13864
Svibanj	651	1275	18524	8821	29271
Lipanj	625	0	17782	12701	31108
Srpanj	0	1275	0	48515	49790
Kolovoz	651	0	16208	17642	34501
Rujan	625	1224	22227	0	24076
Listopad	0	6375	13893	0	20268
Studenj	1250	11016	0	0	12266
Prosinac	1953	10200	0	0	12153
<b>Ukupno</b>	<b>11352</b>	<b>73030</b>	<b>90857</b>	<b>87679</b>	<b>262918</b>

Ukupni godišnji pogonski troškovi za sustav bez akumulacije rashladnog učinka iznose **262 918** kuna.



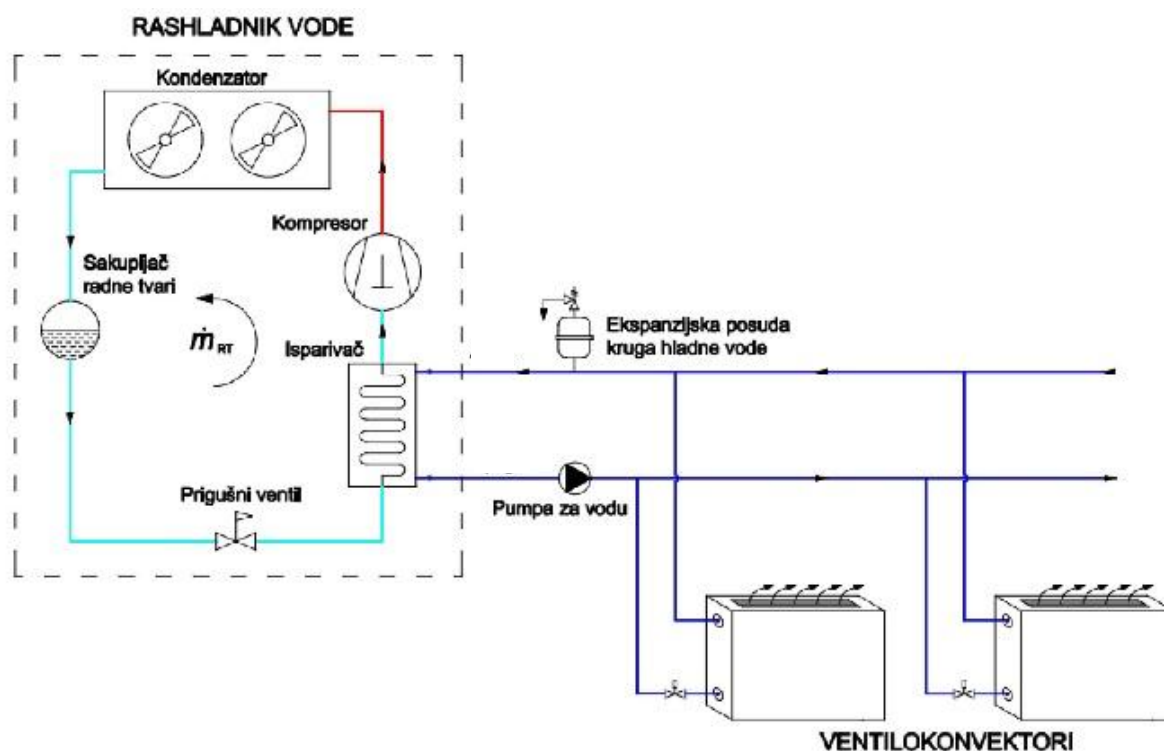
Slika 4.5. Godišnji pogonski troškovi za rashladno postrojenje s akumulacijom rashladnog učinka i bez njega

Korištenjem rashladnog postrojenja s akumulacijom rashladnog učinka, na godišnjoj razini se postižu uštede za pogonske troškove u iznosu od 38100 kuna. Međutim, ova vrsta sustava ima veće investicijske troškove u odnosu na postrojenje bez akumulacije. Razlog većih investicijskih troškova sustava s akumulacijom leži u tome što je za takvu vrstu sustava potreban spremnik rashladne energije što za sobom povlači i sve radove oko njegove ugradnje – zemljani radovi, betonski radovi itd. Tu su nadalje ostali elementi poput pupme, ventila, difuzora, sustava regulacije. Prosječna cijena spremnika zajedno s opremom i ugradnjom vrlo lako doseže milijunske iznose (u kunama). S obzirom na godišnju uštedu od 38100 kuna kod sustava s akumulacijom, cijena povrata investicije bi stoga trajala vrlo dugo.

U dogovoru sa svojim mentorom, odlučeno je da će odabrano rješenje sustava biti indirektno – bez akumulacije rashladnog učinka. Kroz sljedeća poglavlja biti će dano tehničko objašnjenje odabranog sustava, kao i proračun osnovnih komponenti.

## 5. Tehnički opis sustava hlađenja vodom bez akumulacije rashladnog učinka

Glavni element sustava hlađenja vodom je rashladnik vode. Rashladnici vode spadaju u sustave indirektnog hlađenja. Za razliku od direktnog sustava hlađenja gdje se radna tvar razvodi po objektu, kod indirektnog se unutar rashladnika odvija cjelovit ljevokretni rashladni proces s nekom radnom tvari. Svoju primjenu indirektni prijenos topline pronašao je kod posebnih postupaka hlađenja – kad se zahtjeva povećan oprez u radu uređaja ili kad direktno hlađenje nije tehnički izvedivo. Izvedbom indirektnog sustava hlađenja povećava se sigurnost u radu uređaja. Unutar hlađenog prostora se ne nalazi isparivač s direktnim isparivanjem radne tvari koja, ukoliko dođe do njenog propuštanja u okoliš, može biti opasna za ljude i ostala živa bića, a može biti štetna i za robu. U razgranatom sustavu razvoda struji bezopasni radni fluid, najčešće voda ili smjesa vode i antifriz. Voda ima praktički konstantan koeficijent toplinske vodljivosti, za sada još uvijek relativno nisku cijenu i dostupna je. Nedostaci indirektnog sustava u odnosu na direktni su veći pogonski troškovi i manji faktor hlađenja zbog dodatnog izmjenjivača topline voda/radna tvar.



Slika 5.1. Shema sustava hlađenja vodom, indirektni sustav općenito

Prolaskom vode preko isparivača rashladnika, radna tvar preuzima toplinu od nje. Preuzeta toplina služi za isparivanje radne tvari pri tlaku isparivanja  $p_i$ , te za njeno pregrijavanje. Pregrijanjem radne tvari izbjegava se svaka mogućnost da u kompresor dospije dio radne tvari u odliku kapljevine. To bi izazvalo hidraulički udar unutar kompresora što za posljedicu ima mehaničko oštećenje njegovih pokretnih dijelova, te na kraju totalni kvar i prestanak rada. Kompresor usisava pregrijanu paru radne tvari i komprimira je na viši tlak, tlak kondenzacije  $p_k$ . U kondenzatoru se pregrijana para pri tlaku kondenzacije hladi najprije do stanja suhozasićene pare, zatim potpuno kondenzira do stanja vrele kapljevine koja se još dodatno pothlađuje. Pothlađenjem kondenzata povećava se rashladni učinak isparivača. Pothlađena kapljevina se na termoekspanzijskom ventilu prigušuje s tlaka kondenzacije na tlak isparivanja. Time je završen ciklus ljevokretnog rashladnog procesa.

Ohlađena voda uz pomoć pumpi struji kroz ventilokonvektore (izmjenjivač topline) gdje preuzima toplinu od zraka iz prostorije. Ventilator u ventilokonvektorima usisava zrak iz prostorije, zrak se pri tome hladi. Tako ohlađen zrak se ubacuje u prostoriju i miješa se s ostalim zrakom, te ga na taj način pothlađuje. Također, izmjenjivač topline može biti ugrađen unutar kanala sustava ventilacije. Zrak se tada dobavlja pomoću centralnog ventilatora smještenog u strojarnici. Slika 5.2. prikazuje postojeću izvedbu hladnjaka zraka u tvornici obuće.



Slika 5.2. Hladnjak zraka ugrađen unutar ventilacijskog kanala, s okapnicom za odvod kondenzata, tvornica obuće »Bema« - Banja Luka.

Hladnjak zraka se najčešće izrađuje od bakrenih cijevi na koje su postupkom uprešavanja postavljene tanke lamele iz aluminijskog lima. Lamele su profilirane tako da zrak koji struji preko njih prijeđe u režim turbulentnog strujanja. Ovakva vrsta strujnja razbija granični sloj na strani zraka i dovodi do povećanja koeficijenta prijelaza topline na toj istoj strani. Hladnjak se na cjevovod polaza/povrata rashladne vode spaja krutom priрубnicom ili fleksibilnim spojem zbog sprječavanja širenja vibracija. Pri tome se ugrađuje ventil kako bi se omogućila demontaža i popravak izmjenjivača bez ispuštanja i pražnjenja vode iz sistema. Polazni i povratni vod je potrebno izolirati nekim izolacijskim materijalom zbog sprječavanja kondenzacije vlage iz zraka. Često korišten izolacijski materijal je *Armaflex*. Kondenzaciju vlage iz zraka se želi spriječiti zato što nastali kondenzat svojim slijevanjem po strojevima i opremi u proizvodnom pogonu može dovesti do njihovog kvara. Isto tako, pri višim temperaturama, kondenzat je idealno mjesto za nastanak i razvoj bakterija i gljivica koje mogu dovesti do nastanka raznih bolesti i alergije zaposlenika.

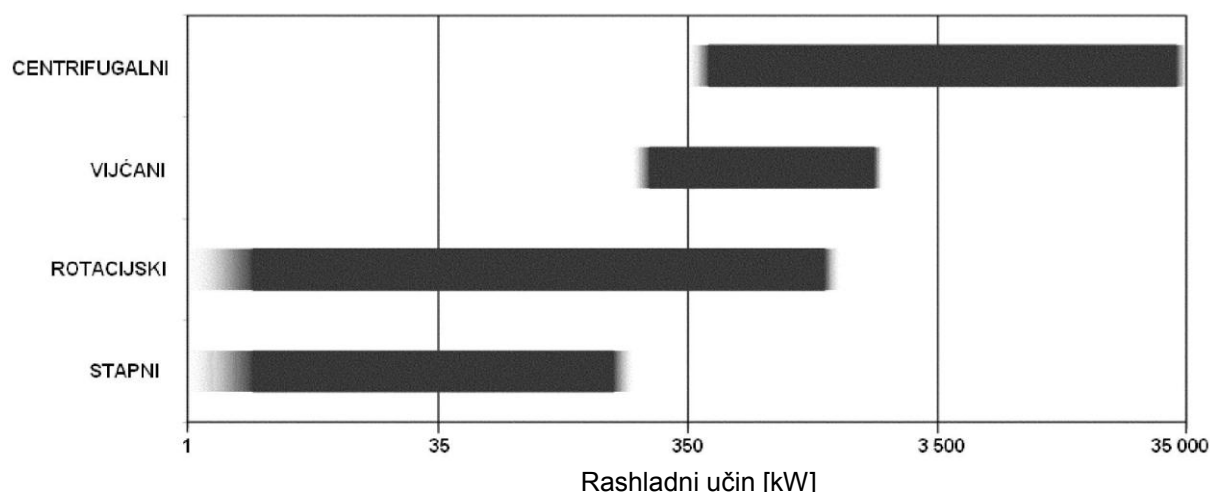
Standardni temperaturni režimi polaz/povrat rashladne vode su 5/11 °C, 6/12 °C i 7/13 °C. Teži se ka tome da voda koja nastrujava na isparivač ima približno konstantan protok zbog toga što se na taj način izbjegava mogućnost smrzavanja vode pri smanjenom protoku, djelomičnom opterećenju sustava. Postoje dva osnovna tipa isparivača – potopljeni i suhi. Za rashladno postrojenje proizvodnog pogona tvornice obuće odabran je suhi tip isparivača koji se koristi kad je radna tvar freon, obzirom da je za ovaj slučaj odabrana zeotropna smjesa R407C. Ova radna tvar se najčešće koristi u sustavima klimatizacije; kao zamjena za dotadašnji freon R22 iz skupine klorofluorouglikovodika koji je štetan za ozon i atmosferu.

Prema ASHRE/IESNA Standard 90.1-1999. navodi se da ukoliko ukupna snaga pumpi vodenog sustava hlađenja premašuje 7,5 kW; taj sustav mora imati kontrolne ventile za regulaciju pomoću kojih se omogućuje varijabilni protok vode s ciljem smanjenja pogonskih troškova za pogon pumpe.

Kondenzator rashladnika vode može biti zrakom ili vodom hlađen. Značajke zrakom hlađenih kondenzatora jesu viša temperatura kondenzacije u odnosu na vodom hlađene, jednostavnije održavanje. Zbog male vrijednosti koeficijenta prijelaza topline na strani zraka, sveukupni koeficijent prolaza topline je također mali. Primjenjuju se za učinke kondenzatora do 300 kW. S porastom učina i njihova površina izmjene

topline mora biti veća. S obzirom da je za ovaj slučaj potrebni učin isparivača 1,04 MW, učin kondenzatora će biti uvećan za snagu kompresora. Stoga bi uz relativno male vrijednosti koeficijenata prolaza topline (15 do 30 W/m<sup>2</sup>K) površina zrakom hlađenog kondenzatora trebala biti prilično velika. S ciljem smanjenja izmjenjivačke površine, odnosno gabaritnih mjera kondenzatora, odabran je vodom hlađeni kondenzator. Konstrukcijska izvedba je poznata pod nazivom *shell & tube* – kondenzator s cijevima u plaštu. Radna tvar se nalazi s vanjske strane cijevi, gdje kondenzira, a unutar cijevi struji voda kojom se kondenzator hladi. To je zbog lakšeg održavanja i čišćenja unutarnjih stijenki cijevi od nastalog kamenca i taloga. Vodom hlađeni kondenzatori uz sebe još dodatno moraju imati rashladni toranj preko kojeg se hladi voda kondenzatorskog kruga. Najniža temperatura do koje se može ohladiti voda na rashladnom tornju je temperatura vlažnog termometra. Vodu kondenzatorskog kruga potrebno je kemijski tretirati zbog sprječavanja stvaranja kamenca u cijevima i razvijanja bakterija u sabirnoj posudi rashladnog tornja. Tokom određenog vremenskog razdoblja, potrebno je sustav nadopunjavati novom količinom vode zbog gubitaka ishlapljivanjem, odnošenjem kapljica u struji zraka i odmuljivanja.

Vrste kompresora koji se najčešće koriste za rashladna postrojenja su: centrifugalni, vijčani, rotacijski i stapni. Slika 5.3. prikazuje korišteni tip kompresora u zavisnosti o rasponu rashladnog učina.



Slika 5.3. Tip kompresora u zavisnosti o rashladnom učinku [21]



Termoekspanzijski ventil, osim što prigušuje pothlađenu kapljevinu radne tvari s tlaka kondenzacije na tlak isparivanja, propušta onoliko radne tvari u isparivač da ona potpuno ispari i služi za dodatno pregrijanje pare radi osiguranja od hidrauličkog udara. Isparivač se napaja radnom tvari preko više manjih paralelnih cijevi. Više manjih cijevi je bolje nego jedna dulja zbog velikog pada tlaka u toj dugačkoj cijevi. Isparivači s velikim hidrauličkim otporima strujanja koriste termoekspanzijske ventile s vanjskim izjednačenjem tlaka čime se smanjuje temperatura na kraju kompresije i održava konstantna temperatura pregrijanja u odnosu na stanje na izlazu iz isparivača. Osjetnik termoekspanzijskog ventila se postavlja na cijev na izlazu iz isparivača i to samo s gornje ili bočne strane. To je zato jer postoji mogućnost da ulje za podmazivanje kompresora ostane na dnu cijevi i ono se ponaša kao neka vrsta izolatora. Usisni vod prema kompresoru obavezno izolirati zajedno s termoosjetnikom da ne bi dobivao krive informacije o temperaturi i da ne dođe do kondenzacije vlage iz okolišnjeg zraka.

Od ostale opreme rashladnog postrojenja indirektnog sustava hlađenja potrebno je navesti još presostate visokog i niskog tlaka, spremnik ukapljene radne tvari, odvajači ulja za podmazivanje, odvajač nekondenzirajućih plinova, filter – sušač radne tvari i kontrolno staklo.

Rashladnici vode koji se koriste u komercijalne svrhe su najčešće smješteni na krov objekta, u podrum ili na kat objekta koji je baš namijenjen za smještaj opreme.

Održavanje sustava hlađenja bitno je, jer se time produljuje radni vijek opreme, smanjuju se pogonski i investicijski troškovi, a kvaliteta pripreme zraka ostaje ista – bitno zbog higijensko – zdravstvenih uvjeta. Svaki proizvođač opreme propisuje vremenske intervale redovnog i periodičnog održavanja.

Pod redovni raspored održavanja spadaju:

- čišćenje isparivača i kondenzatora
- podešavanje temperature, tlaka i protoka
- zamjena filtra ulja i sušila
- pritezanje pokretnih dijelova

Pod periodični raspored održavanja spadaju:

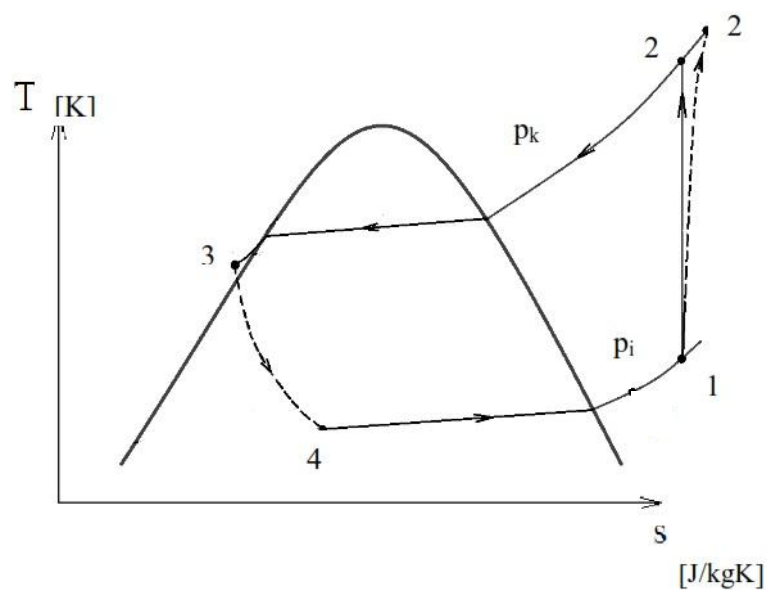
- provjera razine mazivog ulja
- provjera propuštanja radne tvari u okoilš
- mjerenje sadržaja vlage u sustavu
- mjerenje pada tlaka na filtru ulja
- provjera količine i kvalitete radne tvari

## 6. Proračun i odabir osnovnih komponenata rashladnog postrojenja

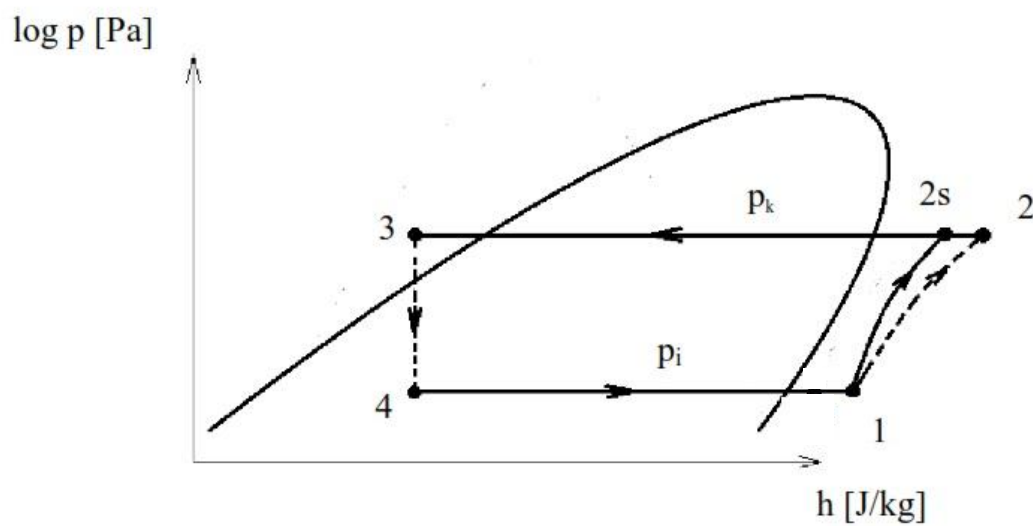
### 6.1. Određivanje radnih točaka procesa

- Zadani podaci:

- radna tvar: R407 C
- učin isparivača:  $\Phi_{isp} = 1050 \text{ kW}$
- tip kondenzatora: hlađen optočnom vodom
- stanje okolišnjeg zraka:  $\vartheta_{ok.} = 35^\circ\text{C}$ ;  $\varphi = 45 \%$
- temperatura pothlađenja vrele kapljevine:  $\Delta\vartheta_{poth} = 4^\circ\text{C}$
- temperatura pregrijanja radne tvari:  $\Delta\vartheta_{preg} = 5^\circ\text{C}$
- temperatura isparivanja:  $\vartheta_{isp} = 1^\circ\text{C}$
- brzina strujanja radne tvari u usisnom dijelu cjevovoda:  $v_1 = 10 \text{ m/s}$
- brzina strujanja radne tvari u tlačnom dijelu cjevovoda:  $v_2 = 12 \text{ m/s}$
- brzina strujanja radne tvari u kapljevinskom dijelu cjevovoda:  $v_3 = 0,7 \text{ m/s}$



Slika 6.1. Prikaz ljevokretnog rashladnog procesa u  $T,s$  dijagramu



Slika 6.2. Prikaz ljevokretnog rashladnog procesa u  $\log p, h$  dijagramu

## 6.2. Određivanje unutarnjih promjera glavnih dionica cjevovoda, nazivnog učina kondenzatora, te snage kompresora

Tablica 6.1. Radne točke procesa [12]

	$\vartheta$ [ °C ]	p [ bar ]	h [kJ/kg ]	s [ kJ/kgK ]
1	9	5,19	416	1,82
2s	50	15,17	443	1,82
2	58	15,17	449,8	
3	30	15,17	245,73	
4	1	5,19	245,73	

Točke naznačene u dijagramima na slikama 6.1. i 6.2. odgovaraju točkama označenim u tablici 6.1.

- Izentropski stupanj djelovanja, jednadžba (6.1); promjena stanja radne tvari od točke 1 do točke 2 naznačeno u dijagramima na slikama 6.1. i 6.2.

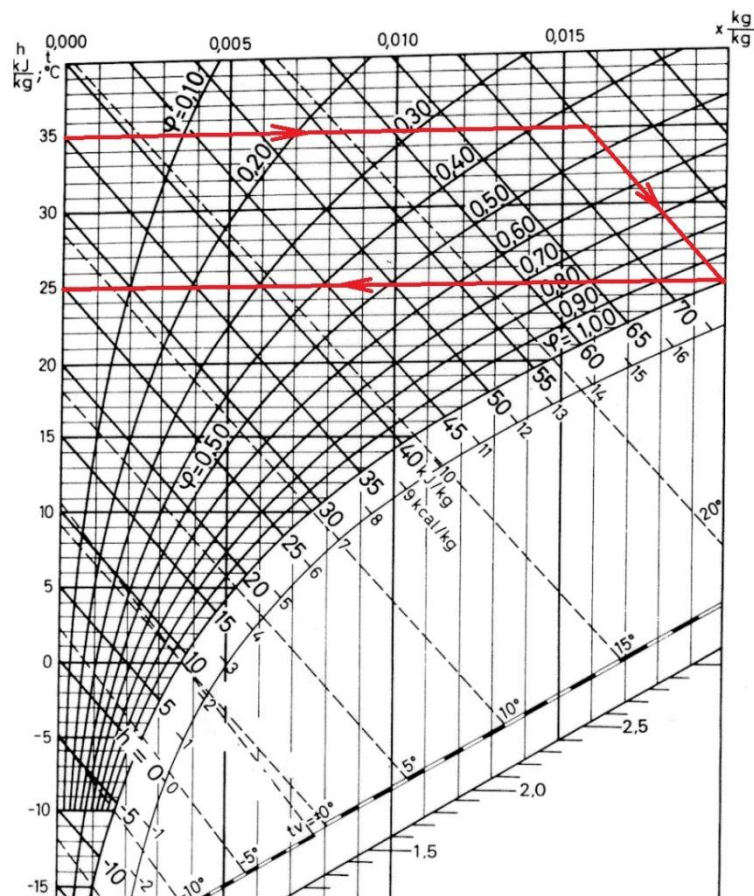
$$\eta_{s,komp.} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = 0,8 \quad (6.1)$$

Entalpija stanja 2 se dobije iz jednadžbe (6.1) nakon što smo očitali ostale podatke; jednadžba (6.1\*)

$$h_2 = \frac{h_{2s} - h_1}{0,8} + h_1 = \frac{443 - 416}{0,8} + 416 = 449,8 \text{ kJ/kg} \quad (6.1^*)$$

- Iz h,x dijagrama, slika 6.3., na temelju podataka za okolišni zrak određena je temperatura granice hlađenja; temperatura vlažnog termometra  $\rightarrow \vartheta_{GH} = 25$  °C.

- Najniža temperatura do koje možemo ohladiti optočnu vodu za hlađenje kondenzatora, preko rashladnog tornja, iznosi  $\vartheta_{W1} = 28\text{ }^{\circ}\text{C}$ . S tom vrijednošću temperature, voda ponovno ide prema kondenzatoru – polaz.
- Pretpostavljeno je da se voda na kondenzatoru zagrije za  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , te povrat iznosi  $\vartheta_{W2} = 33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta\vartheta_W = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Temeljem dobivenih vrijednost temperatura polaza i povrata optočne vode za hlađenje kondenzatora, određena je temperatura kondenzacije i ona iznosi  $\vartheta_{\text{kond}} = 38\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Slika 6.3. h, x dijagram - određivanje temperature granice hlađenje [14]

Maseni protok radne tvari,  $q_{mRT}$  ; jednadžba (6.2):

$$q_{mRT} = \frac{\Phi_{isp}}{h_1 - h_4} = \frac{1050}{416 - 245,73} = 6,17 \text{ kg/s} \quad (6.2)$$

Učin kondenzatora,  $\Phi_{isp}$ ; jednadžba (6.3):

$$\Phi_{kond} = q_{mRT} \cdot (h_{2s} - h_3) = 6,17 \cdot (449,8 - 245,73) = 1259,1 \text{ kW} \quad (6.3)$$

Snaga kompresora,  $P_{komp}$ ; jednadžba (6.4):

$$P_{komp} = q_{mRT} \cdot (h_{2s} - h_1) = 6,17 \cdot (449,8 - 416) = 208,6 \text{ kW} \quad (6.4)$$

Faktor hlađenja,  $\varepsilon_{hl}$ ; jednadžba (6.5):

$$\varepsilon_{hl} = \frac{\Phi_{isp}}{P_{komp}} = \frac{1050}{208,6} = 5,03 \quad (6.5)$$

Usisni dio cjevovoda:

- gustoća radne tvari na usisu u kompresor (stanje 1):

$$\rho_1 = \frac{1}{v_1} = \frac{1}{0,048} = 20,83 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{iznos } v_1 \text{ očitao iz log p,h dijagrama}) [12]$$

- volumenski protok radne tvari računa se prema jednadžbi (6.6):

$$q_{VRT1} = \frac{q_{mRT}}{\rho_1} = \frac{6,17}{20,83} = 0,296 \text{ m}^3/\text{s} \quad (6.6)$$

- za volumenski protok također vrijedi, jednadžba (6.7):

$$q_{VRT1} = v_1 \cdot A_1 \quad (6.7)$$

- iz jednadžbe (6.7) se računa površina slobodnog presjeka strujanja suhozasićene radne tvari, jednadžba (6.8):

$$A_1 = \frac{d_1^2 \cdot \pi}{4} = \frac{q_{VRT1}}{v_1} = \frac{0,296}{10} = 0,0296 \text{ m}^2 \quad (6.8)$$

- unutarnji promjer cjevovoda, jednadžba (6.9):

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot A_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0296}{\pi}} = 0,194m = 19,4cm = 194mm \quad (6.9)$$

Odabrana je standardna čelična cijev DN200; 216x8 mm [9].

#### NAPOMENA:

Daljnji proračun tlačnog i kapljevinskog promjera cjevovoda temelji se na identičnim jednadžbama koje su korištene pri određivanju promjera usisnog cjevovoda.

Tlačni dio cjevovoda:

- gustoća radne tvari na izlazu iz kompresora (stanje 2):

$$\rho_2 = \frac{1}{v_2} = \frac{1}{0,018} = 55,55 kg/m^3 \quad (\text{iznos } v_2 \text{ očitano iz log p,h dijagrama}) [12]$$

- volumenski protok radne tvari:

$$q_{VRT2} = \frac{q_{mRT}}{\rho_2} = \frac{6,17}{55,55} = 0,111 m^3/s$$

- za volumenski protok također vrijedi:

$$q_{VRT2} = v_2 \cdot A_2$$

- površina slobodnog presjeka strujanja komprimirane suhozasićene radne tvari:

$$A_2 = \frac{d_2^2 \cdot \pi}{4} = \frac{q_{VRT2}}{v_2} = \frac{0,111}{12} = 0,0093 \text{ m}^2$$

- unutarnji promjer cjevovoda:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot A_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0093}{\pi}} = 0,109m = 10,9cm = 109mm$$



Odabrana je standardna čelična cijev DN 100; 114,3x3,6 mm [9].

Kapljevinski dio cjevovoda:

- gustoća radne tvari na izlazu iz kondenzatora (stanje 3):

$$\rho_3 = 1012,14 \text{ kg/m}^3 \quad (\text{iznos } \rho_3 \text{ očitano iz [12]})$$

- volumenski protok radne tvari:

$$q_{VRT3} = \frac{q_{mRT}}{\rho_3} = \frac{6,17}{1012,14} = 0,0061 \text{ m}^3/\text{s}$$

- za volumenski protok također vrijedi:

$$q_{VRT3} = v_3 \cdot A_3$$

- površina slobodnog presjeka strujanja pothlađene ukapljene radne tvari:

$$A_3 = \frac{d_3^2 \cdot \pi}{4} = \frac{q_{VRT3}}{v_3} = \frac{0,0061}{0,7} = 0,0087 \text{ m}^2$$

- unutarnji promjer cjevovoda:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot A_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0087}{\pi}} = 0,105 \text{ m} = 10,5 \text{ cm} = 105 \text{ mm}$$

Odabrana je standardna čelična cijev DN 100; 114,3x5 mm [9].

Cjevovod optočne rashladne vode:

- maseni protok optočne vode koja hladi kondenzator, jednadžba (6.10):

$$\Phi_{kond} = q_{mW} \cdot c_W \cdot \Delta \vartheta_W \quad [\text{kW}] \quad (6.10)$$

$q_{mW}$  [kg/s] – maseni protok rashladne vode kroz izmjenjivač topline (kondenzator)

Iz jednadžbe (6.10), slijedi jednadžba (6.11):

$$q_{mW} = \frac{\Phi_{kond}}{c_W \cdot \Delta \vartheta_W} \quad [\text{kg/s}] \quad (6.11)$$

$$q_{mW} = \frac{1260}{4,18 \cdot 5} = 60,3 \text{ kg/s}$$

- volumenski protok rashladne vode:

$$q_{vW} = \frac{q_{mW}}{\rho_W} = \frac{60,3}{995,12} = 0,0606 \text{ m}^3/\text{s} = 218,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

- površina slobodnog presjeka strujanja rashladne vode:

$$A_W = \frac{d_W^2 \cdot \pi}{4} = \frac{q_{vW}}{v_W} = \frac{0,0606}{1,5} = 0,0404 \text{ m}^2$$

- unutarnji promjer cjevovoda rashladne vode:

$$d_W = \sqrt{\frac{4 \cdot A_W}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0404}{\pi}} = 0,227 \text{ m} = 22,7 \text{ cm} = 227 \text{ mm}$$

Odabrana je standardna čelična cijev DN 250; 267x8 mm [9]

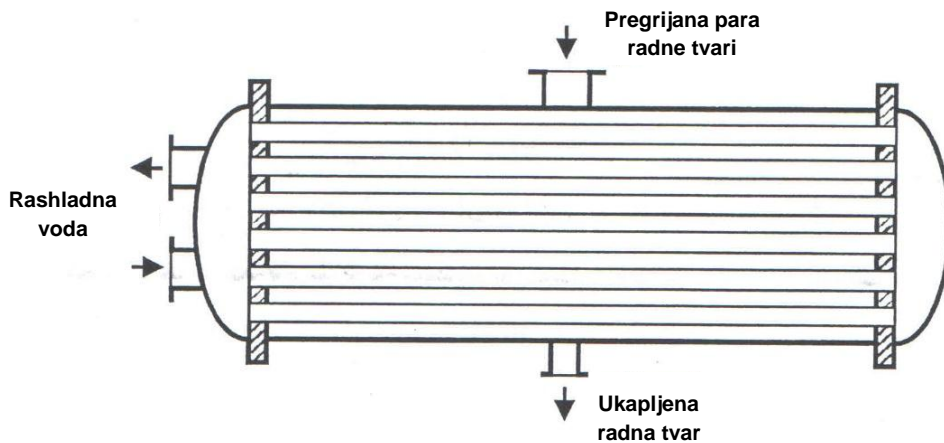
#### NAPOMENA:

Odabrane vrijednosti specifičnog toplinskog kapaciteta  $c_W$ ; gustoće  $\rho_W$  i brzine strujanja rashladne vode  $v_W$ ; bit će pojašnjene dalje u nastavku proračuna kondenzatora.

### 6.3. Proračun kondenzatora

- Ulazni parametri:

- Odabrani tip kondenzatora: Shell & tube
- Učin kondenzatora:  $\Phi_{kond} = 1260 \text{ kW}$
- Temperatura kondenzacije:  $\vartheta_{kond} = 38 \text{ °C}$
- Temperatura rashladne vode na ulazu u kondenzator:  $\vartheta_{w1} = 28 \text{ °C}$
- Temperatura rashladne vode na izlazu iz kondenzatora:  $\vartheta_{w2} = 33 \text{ °C}$
- Radna tvar: R407C



Slika 6.4. »Shell & tube« tip kondenzatora [10]

- Fizikalna svojstva vode, za srednju temperaturu  $\vartheta_{w,sr}$  - jednadžba (6.12); [11]

$$\vartheta_{w,sr} = \frac{\vartheta_{w1} + \vartheta_{w2}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.12)$$

$$\vartheta_{w,sr} = \frac{28 + 33}{2} = 30,5 \text{ °C}$$

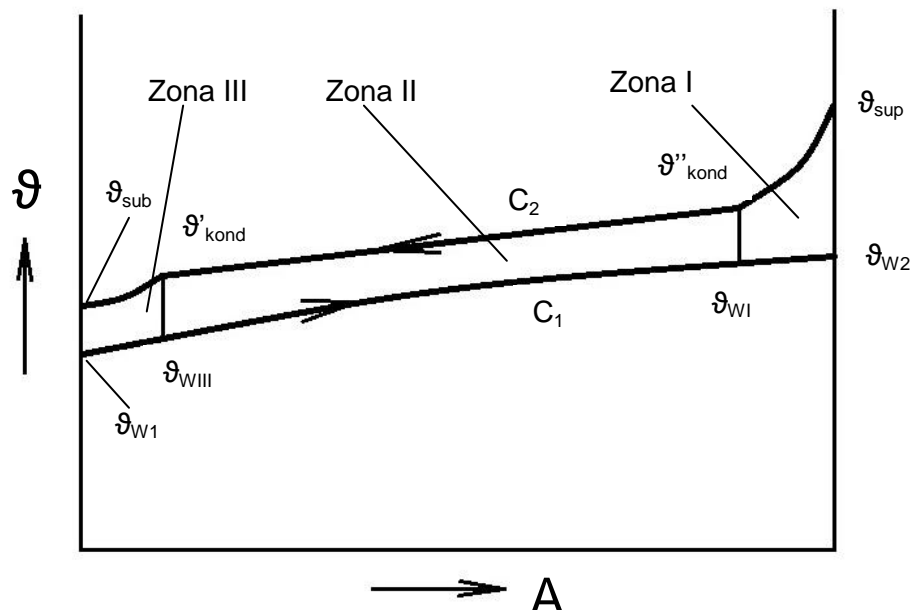
- Gustoća:  $\rho_w = 995,12 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet:  $c_w = 4,18 \text{ kJ/kgK}$
- Toplinska vodljivost:  $\lambda_w = 0,617 \text{ W/mK}$
- Dinamička viskoznost:  $\eta_w = 789,5 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$
- Kinematička viskoznost:  $\nu_w = \frac{\eta_w}{\rho_w} = \frac{789,5 \cdot 10^{-6}}{995,12} = 7,933 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

- Toplinski kapacitet struja izmjenjivača,  $C$ ; jednačba (6.13): [3]

$$C = q_m \cdot c \quad (6.13) \quad [\text{W/K}]$$

$q_m$  [kg/s] – maseni protok pojedine struje

$c$  [J/kgK] – specifični toplinski kapacitet pojedine struje



Slika 6.5. Temperature struja pri kondenzaciji u  $T, A$  dijagramu

*NAPOMENA: Ako se u rashladno postrojenje ugrađuje samo jedan jedini aparat (kondenzator), onda se za proračun potrebne površine za izmjenu topline može zanemariti zona III. [15]*

Pri tome vrijedi da je:  $T_1' = T_{W1}$ ;  $T_1'' = T_{W2}$

$C_1$  – toplinski kapacitet slabije struje

$C_2$  – toplinski kapacitet jače (kondenzirajuće) struje

- Toplinski kapacitet slabije struje,  $C_1$ ; jednačba (6.14):

$$\Phi_{kond} = C_1 \cdot (T_{W2} - T_{W1}) \quad [\text{kW}] \quad (6.14)$$

Iz jednadžbe (6.14), slijedi:

$$C_1 = \frac{\Phi_{kond}}{g_{w2} - g_{w1}} \quad [\text{kW/K}] \quad (6.15)$$

$$C_1 = \frac{1260}{33 - 28} = 252 \quad [\text{kW/K}]$$

Iz jednadžbe (6.13), slijedi jednadžba (6.16):

$$q_{mW} = \frac{C_1}{c_w} = \frac{252}{4,18} = 60,3 \quad [\text{kg/s}] \quad (6.16)$$

$q_{mW}$  [kg/s] – maseni protok rashladne vode kroz izmjenjivač topline (kondenzator)

- Maseni protok vode kroz izmjenjivač topline,  $q_{mW}$ , jednadžba (6.17) [10]:

$$q_{mW} = v_w \cdot \frac{d_u^2 \cdot \pi}{4} \cdot n_{t1} \cdot \rho_w \quad [\text{kg/s}] \quad (6.17)$$

$d_u$  [m], unutarnji promjer cijevi rashladne vode izmjenjivača topline, jednadžba (6.18)

$n_{t1}$  [-] – broj cijevi u jednom prolazu

$v_w$  [m/s] – preporučena brzina strujanja rashladne vode kroz izmjenjivač, [10]

$v_w = 1,5$  m/s (odabrano)

Odabrana je čelična cijev, nazivnog promjera DN 25 – 30X2,6 mm; [9].

$d_v$  [mm] – vanjski promjer cijevi;  $d_v = 30$  mm

$s_c$  [mm] – debljina stijenke cijevi;  $s_c = 2,6$  mm

$$d_u = d_v - 2 \cdot s_c \quad [\text{mm}] \quad (6.18)$$

Iz jednadžbe (6.18), slijedi:

$$d_u = 30 - 2 \cdot 2,6 = 24,8 \text{ mm}$$

Iz jednadžbe (6.17), slijedi jednadžba (6.19):

$$n_{t1} = \frac{q_{mW}}{v_W \cdot \frac{d_u^2 \cdot \pi}{4} \cdot \rho_W} \quad (6.19)$$

$$n_{t1} = \frac{60,3}{1,5 \cdot \frac{0,0248^2 \cdot \pi}{4} \cdot 995,12} = 83,6$$

Odabrano  $n_{t1} = 84$  cijevi DN25 rashladne vode, u jednom prolazu.

- Ukupan broj cijevi Shell & tube izmjenjivača topline, jednadžba (6.20):

$$n_t = n_{t1} \cdot n_p \quad [-] \quad (6.20)$$

$n_p$  [-] – broj prolaza rashladne vode kroz izmjenjivač topline. Preporučeno

$n_p = 2 - 8$  [10]. Odabrano  $n_p = 6$ .

Iz jednadžbe (6.20), slijedi:

$$n_t = 84 \cdot 6 = 504 \quad [-]$$

- Promjer plašta izmjenjivača topline unutar kojeg su smještene cijevi, D; jednadžba (6.21):

$$n_t = 0,75 \cdot \left[ \left( \frac{D}{s} \right)^2 - 1 \right] + 1 \quad [-] \quad (6.21)$$

gdje je:

D [m] – promjer plašta izmjenjivača topline

s [m] – osni razmak između cijevi, odabrano s = 40 mm

Iz jednadžbe (6.21), slijedi:

$$D = \sqrt{s^2 \cdot \left( \frac{n_t - 1}{0,75} + 1 \right)} \quad [\text{m}] \quad (6.22)$$

$$D = \sqrt{0,04^2 \cdot \left( \frac{504 - 1}{0,75} + 1 \right)} = 1,037 \text{ m}$$

Vanjski promjer plašta, odabrano D = 1,1 m.

- Duljina izmjenjivača topline, L; jednadžba (6.23):

$$L = \frac{L_{ov}}{n_t} \quad [\text{m}] \quad (6.23)$$

L [m] – duljina izmjenjivača topline

L<sub>ov</sub> [m] – ukupna duljina cijevi izmjenjivača topline

- Ukupna duljina cijevi izmjenjivača topline, L<sub>ov</sub>; jednadžba (6.24):

$$L_{ov} = \frac{A_e}{d_v \cdot \pi} \quad [\text{m}] \quad (6.24)$$

A<sub>e</sub> [m<sup>2</sup>] – površina izmjene topline svedena na vanjsku površinu cijevi

- Površina izmjene topline, A<sub>e</sub>; jednadžba (6.25):

$$A_e = \frac{\Phi_{kond}}{q_e} \quad [\text{m}^2] \quad (6.25)$$

$q_e$  [W/m<sup>2</sup>] – specifični toplinski tok unutar kondenzatora. Pretpostavljena vrijednost  $q_e = 5700$  W/m<sup>2</sup> [10]

Iz jednadžbe (6.25), slijedi:

$$A_e = \frac{1260 \cdot 10^3}{5700} = 221 \text{ m}^2$$

Iz jednadžbe (6.24), slijedi:

$$L_{ov} = \frac{221}{0,03 \cdot \pi} = 2345 \text{ m}$$

Iz jednadžbe (6.23), slijedi:

$$L = \frac{2345}{504} = 4,65 \text{ m} \approx 4,7 \text{ m}$$

Preporučeno  $L/D = 3$  do  $6$ . Za ovaj slučaj je  $L/D = 4,3$ ; što zadovoljava navedeni uvjet.

### 6.3.1. Termodinamički proračun u zoni I:

- termodinamička svojstva radne tvari u zoni I pri srednjoj temperaturi  $\vartheta_I$ :

$$\vartheta_I = \frac{\vartheta''_{kond} + \vartheta_{sup}}{2} = \frac{40 + 58}{2} = 49 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$\rho_I = 61,7$  kg/m<sup>3</sup>;  $c_I = 1,164$  kJ/kgK;  $\lambda_I = 0,0184$  W/mK;  $\eta_I = 15,8 \cdot 10^{-6}$  Pas;  $\nu_I = 2,561 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s [10]

$$c_I = 836,51 + 2,9326 \cdot \vartheta + 0,0842264 \cdot \vartheta^2 - 2,1836 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta^3 + 4,14625 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta^4 \quad (6.26)$$

$$\lambda = (11,98 + 0,092 \cdot \vartheta - 2,43 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta^2 + 2,14 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta^3) \cdot 10^{-3} \quad (6.27)$$

$$\eta = (11,86 + 0,0536 \cdot \vartheta - 3,55 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta^2 + 1,84 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta^3) \cdot 10^{-6} \quad (6.28)$$



- Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni I,  $\Delta \vartheta_{ml}$ ; jednadžba (6.29); [1]:

$$\Delta \vartheta_{ml} = \frac{(\vartheta_{sup} - \vartheta_{W2}) - (\vartheta''_{kond} - \vartheta_{WI})}{\ln \frac{\vartheta_{sup} - \vartheta_{W2}}{\vartheta''_{kond} - \vartheta_{WI}}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6.29)$$

$$\Delta \vartheta_{ml} = \frac{(58 - 33) - (40 - 32,53)}{\ln \frac{58 - 33}{40 - 32,53}} = 14,51 \quad ^{\circ}\text{C}$$

Iz slike 6.5. slijedi:

- Temperatura rashladne vode na ulazu u zonu I, jednadžba (6.30):

$$\vartheta_{WI} = \vartheta_{W2} - \frac{\Phi_{preg}}{q_{mW} \cdot c_W} \quad ^{\circ}\text{C} \quad (6.30)$$

$$\vartheta_{WI} = 33 - \frac{118,5}{60,3 \cdot 4,181} = 32,53$$

- Toplinski tok predan rashladnoj vodi pri ohlađivanju pare radne tvari od pregrijane do suhozasićene, jednadžba (6.31):

$$\Phi_{preg} = q_{mRT} \cdot (h_2 - h'') \quad (6.31)$$

$$\Phi_{preg} = 6,17 \cdot (449,8 - 430,6) = 118,5 \quad \text{kW}$$

- Ekvivalentan broj cijevi izmjenjivača topline u jednom horizontalnom redu:  
U gornjem dijelu kondenzatora (na ulazu pregrijane pare) je broj cijevi manji, pa slijedi jednadžba (6.32):

$$n_{eqv} = 0,3 \cdot n_t^{0,5} \quad (6.32)$$

$$n_{eqv} = 0,3 \cdot 504^{0,5} = 6,73$$

- Površina između cijevi u gornjem dijelu kondenzatora, jednadžba (6.33):

$$A_s = n_{eqv} \cdot (s - d_v) \cdot L \quad (6.33)$$

$$A_s = 6,73 \cdot (0,04 - 0,03) \cdot 4,7 = 0,3163 \text{ m}^2$$

- Volumenski protok radne tvari između cijevi:

$$q_{VRT} = \frac{q_{mRT}}{\rho_I}$$

$$q_{VRT} = \frac{6,17}{61,7} = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Brzina radne tvari između cijevi:

$$v_{RT} = \frac{q_{VRT}}{A_s} = \frac{0,1}{0,3163} = 0,3161 \text{ m/s}$$

Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari

- Reynoldsov broj:

$$\text{Re} = \frac{v_{RT} \cdot d_v}{\nu_I} \quad (6.34)$$

$$\text{Re} = \frac{0,3161 \cdot 0,03}{2,561 \cdot 10^{-7}} = 37028$$

- Prandtlov broj:

$$\text{Pr} = \frac{\eta_I \cdot c_I}{\lambda_I} \quad (6.35)$$

$$\text{Pr} = \frac{15,8 \cdot 10^{-6} \cdot 1164}{0,0184} = 0,9995$$

- Nusselt:

$$\text{Nu} = 0,4 \cdot \text{Re}^{0,6} \cdot \text{Pr}^{0,36} \quad (6.36)$$

$$\text{Nu} = 0,4 \cdot 37028^{0,6} \cdot 0,9995^{0,36} = 220,34$$

- Koeficijent prijelaza topline, jednadžba (6.37):

$$\alpha_I = \frac{Nu \cdot \lambda_I}{d_v} \quad (6.37)$$

$$\alpha_I = \frac{220,34 \cdot 0,0184}{0,03} = 135,14 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Koeficijent prijelaza topline na strani vode, jednadžba (6.38)::

$$\alpha_w = f_w \cdot B_w \cdot \frac{v^{0,8}}{d_u^{0,2}} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (6.38)$$

$\alpha_w$  [W/m<sup>2</sup>K] – koeficijent prijelaza topline na strani vode

$f_w$  [-] – korekcijski faktor, ovisi o Reynoldsovom broju

$f_w = 1$  za  $Re > 10000$  (turbulentno strujanje)

$f_w = - 0,0101183 (Re/1000)^2 + 0,18978 (Re/1000) + 0,106247$ ; za  $2300 < Re < 10000$

$B_w$  [-] – koeficijent koji sadrži fizikalna svojstva vode pri  $\vartheta_{w, sr} = 30,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ; jednadžba (6.39); [10]

$$B_w = 0,023 \cdot \rho_w^{0,8} \cdot c_w^{0,4} \cdot \lambda_w^{0,6} \cdot \eta_w^{-0,4} \quad (6.39)$$

$$B_w = 0,023 \cdot 995,12^{0,8} \cdot 4180^{0,4} \cdot 0,617^{0,6} \cdot (789,5 \cdot 10^{-6})^{-0,4} = 2107,31$$

Reynoldsov broj,  $R_e$ ; jednadžba (6.40):

$$R_e = \frac{v_w \cdot d_u}{\nu_w} \quad [-] \quad (6.40)$$

$$R_e = \frac{1,5 \cdot 0,0248}{(7,933)^{-7}} = 46893$$

$$R_e = 46893 > 10000 \rightarrow f_w = 1 \quad [10]$$

Iz jednadžbe (6.38), slijedi:

$$\alpha_w = 1 \cdot 2107,31 \cdot \frac{1,5^{0,8}}{0,0248^{0,2}} = 6105,4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Toplinski otpor provođenju topline kroz cijevnu stijenku u toku eksploatacije kondenzatora,  $R_1$  ; jednadžba (6.41):

$$R_1 = \left( \frac{s_c}{\lambda_1} \right) \cdot \left( \frac{d_u}{d_m} \right) \quad [\text{m}^2\text{K/W}] \quad (6.41)$$

$\lambda_1$  [W/mK] – toplinska vodljivost čelične cijevi

Materijal je čelik za čelične bešavne cijevi, Č.1213 (do 0,22% C) [9].

$\lambda_1 = 50$  W/mK; [11] – toplinska svojstva krutina.

$d_m$  [m] – srednji promjer cijevi, jednadžba (6.42):

$$d_m = \frac{d_u + d_v}{2} = \frac{0,0248 + 0,03}{2} = 0,0274 \text{ m} \quad (6.42)$$

Iz jednadžbe (1.31), slijedi:

$$R_1 = \left( \frac{0,0026}{50} \right) \cdot \left( \frac{0,0248}{0,0274} \right) = 0,000047 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$R_2 = \frac{\delta_2}{\lambda_2} \quad [\text{m}^2\text{K/W}] \quad (6.43)$$

$R_2$  [m<sup>2</sup>K/W] – toplinski otpor na strani vode uslijed stvaranja kamenca na unutarnjoj površini cijevne stijenke.

$\delta_2$  [mm] – pretpostavljena debljina nastalog kamenca tokom eksploatacije kondenzatora. Uzeta vrijednost  $\delta_2 = 0,5$  mm. [4]

$\lambda_2$  [W/mK] – toplinska vodljivost kamenca. Uzeta vrijednost  $\lambda_2 = 2$  W/mK [4].

Iz jednadžbe (6.43), slijedi:

$$R_2 = \frac{0,0005}{2} = 0,00025 \quad \text{m}^2\text{K/W}$$

$R_3$  [m<sup>2</sup>K/W] – toplinski otpor uslijed stvaranja hrđe i ostalog taloga (mulja) .

$R_3 = 0,00025$  [m<sup>2</sup>K/W] – pretpostavljena vrijednost [4].

Ukupni toplinski otpor, jednadžba (6.44):

$$R_{uk} = R_1 + R_2 + R_3 \quad [\text{m}^2\text{K/W}] \quad (6.44)$$

$$R_{uk} = 0,000047 + 0,00025 + 0,00025 = 0,000547 \quad \text{m}^2\text{K/W}$$

Koeficijent prolaza topline u zoni I, jednadžba (6.45):

$$k_I = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_I} + \left( R_{uk} + \frac{1}{\alpha_W} \right) \cdot \frac{d_v}{d_u}} \quad (6.45)$$

$$k_I = \frac{1}{\frac{1}{135,14} + \left( 0,000547 + \frac{1}{6105,4} \right) \cdot \frac{0,03}{0,0248}} = 121,19 \quad \text{W/m}^2\text{K}$$

Specifični toplinski tok unutar zone I, jednadžba (6.46):

$$q_I = k_I \cdot \Delta \vartheta_{mI} \quad (6.46)$$

$$q_I = 121,19 \cdot 14,51 = 1758,5 \quad \text{W/m}^2$$

Površina izmjene topline u zoni I, jednadžba (6.47):

$$A_I = \frac{\Phi_{preg}}{q_I} \quad (6.47)$$

$$A_I = \frac{119,33 \cdot 10^3}{1758,5} = 67,86 \text{ m}$$

### 6.3.2. Termodinamički proračun u zoni II:

- Specifični toplinski tok u zoni II izražen preko strane vode, jednadžba (6.48):

$$q_{iII} = \frac{g_z - g_{W,sr}}{\frac{1}{\alpha_W} + R_{uk}} \quad [\text{W/m}^2] \quad (6.48)$$

$g_z$  [°C] – temperatura površine cijevne stijenke na strani vode.

- Srednja temperatura vode u zoni II, jednadžba (6.49):

$$g_{W,sr} = g_{kond} - \Delta g_{mII} \quad (6.49)$$

$$g_{W,sr} = 38 - 6,84 = 31,16 \text{ °C}$$

- Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni II, jednadžba (6.50):

$$\Delta g_{mII} = \frac{(g''_{kond} - g_{WI}) - (g'_{kond} - g_{WIII})}{\ln \frac{g''_{kond} - g_{WI}}{g'_{kond} - g_{WIII}}} \quad (6.50)$$

$$g_{WIII} = g_{WI} - \frac{\Phi_{kondenzacija}}{q_{mW} \cdot c_W} \quad (6.51)$$

$$\Phi_{kondenzacija} = q_{mRT} \cdot (h'' - h') \quad (6.52)$$

$$\Phi_{kondenzacija} = 6,17 \cdot (430,6 - 252,84) = 1096,8 \text{ kW}$$

$$g_{WIII} = 32,53 - \frac{1096,8}{60,3 \cdot 4,181} = 28,175 \text{ kW}$$

$$\Delta g_{mII} = \frac{(40 - 32,53) - (34,42 - 28,175)}{\ln \frac{40 - 32,53}{34,42 - 28,175}} = 6,84 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Iz jednadžbe (6.48), slijedi; jednadžba (6.53):

$$q_{III} = \frac{g_z - 31,16}{\frac{1}{6105,4} + 0,000547} = 1406,89 \cdot (g_z - 31,16) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (6.53)$$

- Specifični toplinski tok unutar zone II,  $q_{eII}$ , izražen preko specifičnog toplinskog na strani vode,  $q_{III}$ ; jednadžba (6.54) :

$$q_{eII} = \frac{A_i}{A_e} \cdot q_{III} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (6.54)$$

Za obične cijevi vrijedi; jednadžba (6.55):  $\frac{A_u}{A_e} = \frac{d_u}{d_v}$  (6.55) [4]

Iz jednadžbe (6.54), slijedi jednadžba (6.56):

$$q_{eII} = \frac{d_u}{d_v} \cdot q_{III} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (6.56)$$

$$q_{eII} = \frac{24,8}{30} \cdot [1406,89 \cdot (g_z - 31,16)] = 1163,03(g_z - 31,16)$$

$$q_{eII} = 1165,2(g_z - 31,5) \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (6.57)$$

- Koeficijent prijelaza topline u zoni II na strani radne tvari (izražen preko Nusselt-a); jednadžba (6.58); [4]:

$$\alpha_{II} = 0,725 \cdot B \cdot d_v^{-0,25} \cdot f^{\frac{-1}{6}} \cdot \psi_c \cdot (g_{kond} - g_z)^{-0,25} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (6.58)$$

B [-] – koeficijent koji sadrži fizikalna svojstva ukapljene radne tvari pri stanju zasićenja; jednadžba (6.59)

$$B = \left( \frac{g \cdot r \cdot \rho_{II}^2 \cdot \lambda_{II}^3}{\mu_{II}} \right)^{0,25} \text{ [-]} \quad (6.59)$$

- Termodinamička svojstva ukapljene radne tvari u zoni II, pri temperaturi  $\vartheta' = 34,42 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$g \text{ [m/s}^2\text{]}$  – Zemljina gravitacija,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

$r \text{ [kJ/kg]}$  – specifična toplota kondenzacije;  $r_{II} = 177,76 \text{ kJ/kg}$  [2]

$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]}$  – gustoća radne tvari,  $\rho_{II} = 1095,5 \text{ kg/m}^3$  [2]

$\lambda \text{ [W/mK]}$  – toplinska vodljivost radne tvari,  $\lambda_{II} = 0,493 \text{ W/mK}$  [2]

$\eta \text{ [Ns/m}^2\text{]}$  – dinamička viskoznost radne tvari,  $\mu_{II} = 1,288 \cdot 10^{-4} \text{ Ns/m}^2$  [2]

$$\lambda = 0,0934 - 0,333 \cdot 10^{-3} \cdot \vartheta + 2,23 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta^2 - 1,42 \cdot 10^{-8} \cdot \vartheta^3 \quad (6.60)$$

$$\eta = (218 - 2,83 \cdot \vartheta + 0,022 \cdot \vartheta^2 - 0,000138 \cdot \vartheta^3) \cdot 10^{-6} \quad (6.61)$$

$\psi_c = 1[-]$ , za obične cijevi [4]

Iz jednadžbe (6.59), slijedi:

$$B = \left( \frac{9,81 \cdot 177,76 \cdot 10^3 \cdot 1095,5^2 \cdot 0,082^3}{1,4103 \cdot 10^{-4}} \right)^{0,25} = 1691,3$$

$f [-]$  – srednji broj cijevi u vertikalnom redu, jednadžba (6.62); [4]

$$f = \frac{0,9 \cdot D}{1,732 \cdot s} \quad [-] \quad (6.62)$$

$$f = \frac{0,9 \cdot 1,1}{1,732 \cdot 0,04} = 14,29 \approx 14$$

Iz jednadžbe (6.58), slijedi jednadžba (6.63):

$$\alpha_{II} = 0,725 \cdot 1691,3 \cdot 0,03^{-0,25} \cdot 14^{\frac{-1}{6}} \cdot 1 \cdot (38 - \vartheta_z)^{-0,25}$$

$$\alpha_{II} = 1897,83 \cdot (38 - \vartheta_z)^{-0,25} \text{ [W/m}^2\text{K]} \quad (6.63)$$

Toplinski otpor prijelazu topline sa strane radne tvari se uzima nula. [4]



- Specifični toplinski tok sa strane radne tvari,  $q_e$ ; jednadžba (6.64):

$$q_{eII} = \alpha_{RT} \cdot (38 - \vartheta_z) \quad [\text{W/m}^2] \quad (6.64)$$

$$q_{eII} = 1897,83 \cdot (38 - \vartheta_z)^{0,75} \quad [\text{W/m}^2] \quad (6.65)$$

Iterativnim postupkom rješavanja jednadžbi (6.57) i (6.65) dobiven je specifični toplinski tok  $q_{eII} = 4390,85 \text{ W/m}^2$  koji se razlikuje od prethodno pretpostavljenog.

Uz specifični toplinski tok unutar zone II  $q_{eII} = 4390,85 \text{ W/m}^2$  dobiva se površinska temperatura cijevne stijenke na strani vode od  $\vartheta_z = 34,94 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Iz jednadžbe (6.63) slijedi koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari u zoni II:

$$\alpha_{II} = 1897,83 \cdot (38 - 34,94)^{-0,25} = 1435 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Koeficijent prolaza topline u zoni II:

$$k_{eII} = \frac{q_{eII}}{\Delta \vartheta_{mII}}$$

$$k_{eII} = \frac{4390,85}{6,84} = 641,94 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Površina izmjene topline u zoni II,  $A_{II}$ :

$$A_{II} = \frac{\Phi_{kond}}{q_{eII}}$$

$$A_{II} = \frac{1096,8 \cdot 10^3}{4390,85} = 249,8 \text{ m}^2$$

Ukupna površina izmjene topline, jednadžba (6.66):

$$A_e = A_I + A_{II} \quad (6.66)$$

$$A_e = 67,86 + 249,8 = 317,77 \text{ m}^2$$

Specifični toplinski tok unutar kondenzatora:

$$q_e = \frac{\Phi_{kond}}{A_e} = \frac{1260 \cdot 10^3}{317,77} = 3965,1 \text{ W/m}^2$$

- Ukupna duljina cijevi izmjenjivača topline,  $L_{ov}$ :

$$L_{ov} = \frac{317,77}{0,03 \cdot \pi} = 3371,6 \text{ m}$$

- Duljina izmjenjivača topline,  $L$ :

$$L = \frac{3371,6}{504} = 6,7 \text{ m}$$

Preporučeno  $L/D = 3$  do  $6$ . Za ovaj slučaj je  $L/D = 6,09$ ; što zadovoljava navedeni uvjet.

### 6.3.3. Proračun pada tlaka u kondenzatoru na strani vode

- Proračun pada tlaka na strani vode; jednadžba (6.67):

$$\Delta p = \left( \zeta \cdot \frac{L}{d_u} + \zeta_{in} + 1 + \frac{\zeta_{in} + 1}{n_p} \right) \cdot n_p \cdot \frac{\rho_w \cdot v_w^2}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (6.67)$$

$\zeta$  [-] – linijski koeficijent otpora; jednadžba (6.68), [4]

$$\zeta = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} \quad [-] \quad (6.68)$$

$$\zeta = \frac{0,3164}{46893^{0,25}} = 0,0215$$

$\zeta_{in}$  [-] – lokalni koeficijent otpora prilikom ulaska vode u snop cijevi izmjenjivača.

$$\zeta_{in} \approx 0,5; [4]$$

Iz jednadžbe (6.67), slijedi jednadžba (6.69):

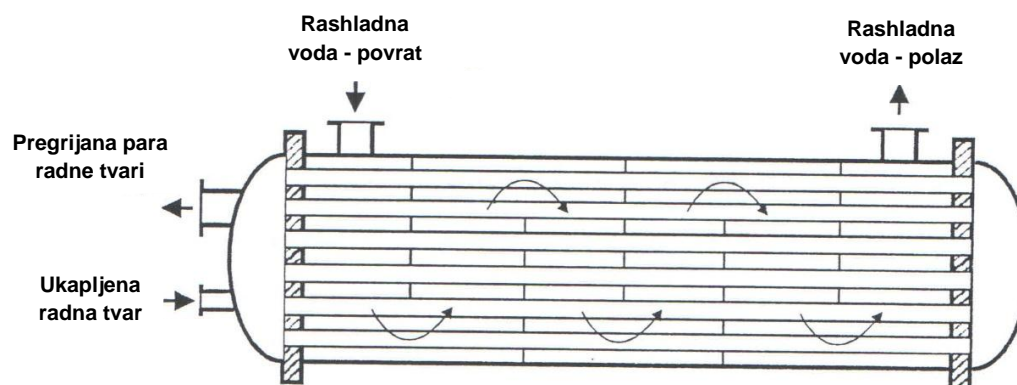
$$\Delta p = \left( \zeta \cdot \frac{L}{d_u} + \frac{1,5}{n_p} + 1,5 \right) \cdot n_p \cdot \frac{\rho_w \cdot v_w^2}{2} \quad [\text{Pa}] \quad (6.69)$$

$$\Delta p = \left( 0,0215 \cdot \frac{6,7}{0,0248} + \frac{1,5}{6} + 1,5 \right) \cdot 6 \cdot \frac{995,12 \cdot 1,5^2}{2} = 50771 \text{ Pa} = 0,5077 \text{ bar}$$

#### 6.4. Proračun isparivača

- Ulazni parametri:

- Odabrani tip isparivača: Shell & tube, suhi tip
- Učin kondenzatora:  $\Phi_{isp} = 1050 \text{ kW}$
- Temperatura kondenzacije:  $\vartheta_{kond} = 38 \text{ °C}$
- Temperatura rashladne vode na ulazu u isparivač:  $\vartheta_{w1} = 12 \text{ °C}$
- Temperatura rashladne vode na izlazu iz isparivača:  $\vartheta_{w2} = 6 \text{ °C}$
- Radna tvar: R407C



Slika 6.6. »Shell & tube« suhi tip isparivača [10]

- Konstrukcijski parametri (pretpostavljeno):

- Promjer plašta isparivača:  $D = 1,2 \text{ m}$
- Vanjski promjer cijevi:  $d_v = 0,02 \text{ m}$
- Unutarnji promjer cijevi:  $d_u = 0,016 \text{ m}$
- Razmak između cijevi:  $s = 0,03 \text{ m}$

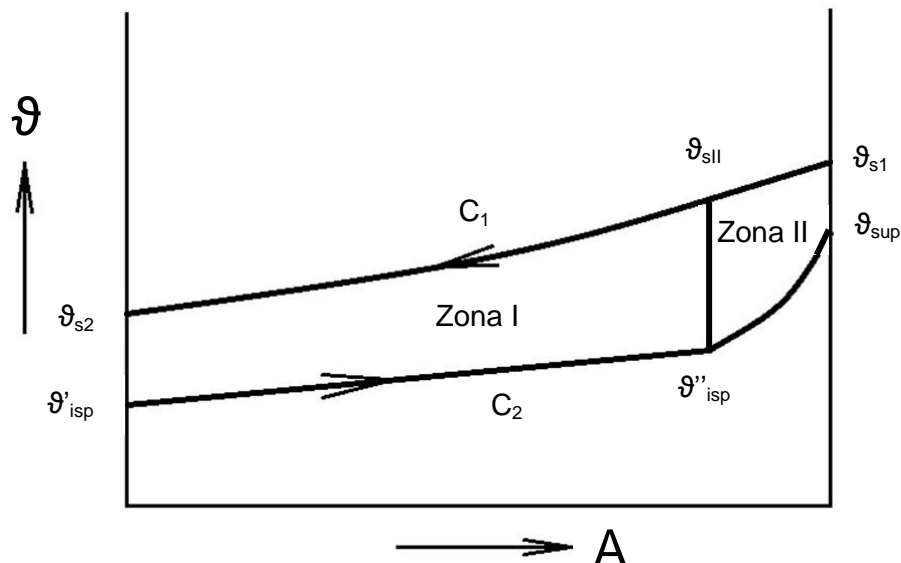
- Fizikalna svojstva hladene vode, za srednju temperaturu  $\vartheta_{w,sr}$ :

$$\vartheta_{w,sr} = \frac{\vartheta_{w1} + \vartheta_{w2}}{2} \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\vartheta_{w,sr} = \frac{12 + 6}{2} = 9 \text{ }^\circ\text{C}$$

- Gustoća:  $\rho_w = 999,74 \text{ kg/m}^3$
- Specifični toplinski kapacitet:  $c_w = 4,1977 \text{ kJ/kgK}$
- Toplinska vodljivost:  $\lambda_w = 0,5781 \text{ W/mK}$
- Dinamička viskoznost:  $\eta_w = 1348,46 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$

$$\text{Kinematička viskoznost: } \nu_w = \frac{\eta_w}{\rho_w} = \frac{1348,46 \cdot 10^{-6}}{999,74} = 1,35 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$



Slika 6.7. Temperature struja pri isparivanju u  $\theta, A$  dijagramu [1]

- Maseni protok hladene vode kroz izmjenjivač – isparivač:

$$q_{mW} = \frac{\Phi_{isp}}{c_W \cdot (g_{W1} - g_{W2})} \quad [\text{kg/s}]$$

$$q_{mW} = \frac{1050}{4,1977 \cdot (12 - 6)} = 41,7 \text{ kg/s}$$

- Volumenski protok hladene vode:

$$q_{VmW} = \frac{q_{mW}}{\rho_W} = \frac{41,7}{999,74} = 0,0417 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Proračun broja cijevi, prema jednadžbi (6.21):

$$n_t = 0,75 \cdot \left[ \left( \frac{1,2}{0,03} \right)^2 - 1 \right] + 1 = 1200,25$$

$$n_t = 1200 \quad (\text{usvojeno})$$

- Ekvivalentan broj cijevi u jednom horizontalnom redu, jednadžba (6.70):

$$n_{eqv} = 0,502 \cdot \pi^{0,5} \cdot n_t^{0,5} \quad (6.70)$$

$$n_{eqv} = 0,502 \cdot \pi^{0,5} \cdot 1200^{0,5} = 30,82$$

- Poprečno nastrujavana površina cijevi u jednom prolazu, jednadžba (6.71):

Odabran broj prolaza radne tvari kroz isparivač:  $n_p = 6$

$$A_R = \frac{\pi \cdot n_t \cdot d_u^2}{4 \cdot n_p} \quad (6.71)$$

$$A_R = \frac{\pi \cdot 1200 \cdot 0,016^2}{4 \cdot 6} = 0,0402 \text{ m}^2$$

- Koeficijent termofizičkih svojstava radne tvari R407 C pri temperaturi isparivanja,  $g_{isp} = 1 \text{ } ^\circ\text{C}$  []

$$C = 0,18599$$

- Toplinski otpor provođenju topline kroz cijevnu stijenku u toku eksploatacije kondenzatora,  $R_1$  ; jednačba (6.41):

$$R_1 = \left( \frac{s_c}{\lambda_1} \right) \cdot \left( \frac{d_u}{d_m} \right) \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

$\lambda_1$  [W/mK] – toplinska vodljivost čelične cijevi

$s_c$  – debljina stijenke cijevi,  $s_c = 0,004$  m.

Materijal je čelik za čelične bešavne cijevi, Č.1213 (do 0,22% C) [3].

$\lambda_1 = 50$  W/mK; [5] – toplinska svojstva krutina.

$d_m$  [m] – srednji promjer cijevi, jednačba (6.42):

$$d_m = \frac{d_u + d_v}{2} = \frac{0,016 + 0,02}{2} = 0,018 \text{ m}$$

Iz jednačbe (1.31), slijedi:

$$R_1 = \left( \frac{0,004}{50} \right) \cdot \left( \frac{0,016}{0,018} \right) = 0,000071 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$R_2 = 0,0001$  [m<sup>2</sup>K/W] – pretpostavljena vrijednost [10].

Ukupni toplinski otpor, jednačba (6.44):

$$R_{uk} = R_1 + R_2 \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

$$R_{uk} = 0,000071 + 0,0001 = 0,000171 \text{ m}^2\text{K/W}$$

- Srednja temperatura pregrijanja radne tvari, slika 6.7:

$$g_{supm} = \frac{g'_{sup}}{2} + g''_{isp} = \frac{9}{2} + 4 = 8,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Termodinamička svojstva radne tvari u zoni II pri temperaturi  $\vartheta_{supm} = 8,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ :

$\rho_{II} = 20,83 \text{ kg/m}^3$ ;  $c_{II} = 0,8664 \text{ kJ/kgK}$ ;  $\lambda_{II} = 0,01276 \text{ W/mK}$ ;  $\eta_{II} = 12,3 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$ ;  $\nu_{II} = 5,905 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  [12]

- Specifična toplota isparivanja radne tvari u zoni I, jednadžba (6.72):

$$q_I = h'' - h_4 \quad (6.72)$$

$$q_I = 414,4 - 245,73 = 168,67 \text{ kJ/kg}$$

- Toplinski tok unutar zone I, jednadžba (6.73) :

$$\Phi_I = q_{mRT} \cdot q_I \quad (6.73)$$

$$\Phi_I = 6,17 \cdot 168,67 = 1040,7 \text{ kW}$$

- Toplinski tok unutar zone II, jednadžba (6.74) :

$$\Phi_{II} = \Phi_{isp} - \Phi_I \quad (6.74)$$

$$\Phi_{II} = 1050 - 1040,7 = 9,3 \text{ kW}$$

- Temperatura hlađene vode na ulazu u zonu I, slika 6.7:

$$\vartheta_{sII} = \vartheta_{sI} - \frac{\Phi_{II}}{q_{mW} \cdot c_W}$$

$$\vartheta_{sII} = 12 - \frac{9,3}{41,7 \cdot 4,1977} = 11,95 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni I, slika 6.7:

$$\Delta \vartheta_{ml} = \frac{(\vartheta_{sII} - \vartheta'_{isp}) - (\vartheta_{s2} - \vartheta'_{isp})}{\ln \frac{\vartheta_{sII} - \vartheta'_{isp}}{\vartheta_{s2} - \vartheta'_{isp}}}$$

$$\Delta \vartheta_{ml} = \frac{(11,95 - 4) - (6 - 1)}{\ln \frac{11,95 - 4}{6 - 1}} = 6,36 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Srednja logaritamska temperaturna razlika u zoni II, slika 6.7:

$$\Delta g_{mII} = \frac{(g_{sII} - g''_{isp}) - (g_{s1} - g_{sup})}{\ln \frac{g_{sII} - g''_{isp}}{g_{s1} - g_{sup}}}$$

$$\Delta g_{mII} = \frac{(11,95 - 4) - (12 - 9)}{\ln \frac{11,95 - 4}{12 - 9}} = 5,08 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Pretpostavljeni razmak između segmentnih pregrada:  $b_s = 0,5 \text{ m}$ .
- Površina oko cijevi u jednom segmentnom dijelu, jednadžba (6.75):

$$A_s = n_{eqv} \cdot (s - d_v) \cdot b_s \quad (6.75)$$

$$A_s = 30,82 \cdot (0,03 - 0,02) \cdot 0,5 = 0,1541 \text{ m}^2$$

- Brzina strujanja hladene vode oko cijevi isparivača:

$$v_W = \frac{q_{vmW}}{A_s} = \frac{0,0417}{0,1541} = 0,271 \text{ m/s}$$

- Reynoldsov broj, jednadžba (6.40):

$$\text{Re} = \frac{v_W \cdot d_v}{\nu_W}$$

$$\text{Re} = \frac{0,271 \cdot 0,02}{1,35 \cdot 10^{-6}} = 4015$$

- Korekcijski faktor  $f_r$  – zavisi o broju horizontalnih redova cijevi,  $n_r$  [10]

$$n_r = \frac{D}{s} \quad (6.76)$$

$$n_r = \frac{1,2}{0,03} = 40;$$

$$f_r = 1, \text{ za } n_r > 14.$$



- Nusseltov broj, jednačba (6.77):

$$Nu = 0,36 \cdot f_r \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \quad (6.77)$$

$$Nu = 0,36 \cdot 1 \cdot 4015^{0,6} \cdot 9,796^{0,36} = 118,93$$

- Koeficijent prijelaza topline na strani vode, jednačba (6.37):

$$\alpha_w = \frac{Nu \cdot \lambda_w}{d_v}$$

$$\alpha_w = \frac{118,93 \cdot 0,5781}{0,02} = 3437,7 \text{ W/m}^2\text{K}$$

#### 6.4.1. Termodinamički proračun u zoni I:

- Pretpostavljeni koeficijent prolaza topline sveden na unutrašnju površinu cijevne stijenke:  $k_{lpret.} = 1000 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Specifični toplinski tok (pretpostavljen), jednačba (6.78):

$$q_{lpret.} = k_{lpret.} \cdot \Delta \vartheta_{ml} \quad (6.78)$$

$$q_{lpret.} = 1000 \cdot 6,36 = 6360 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Maseno ubrzanje u cijevi, jednačba (6.79):

$$G = \frac{q_{mRT}}{A_R} \quad (6.79)$$

$$G = \frac{6,17}{0,0402} = 153,48 \text{ kg/m}^2\text{s}$$

- Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari, jednačba (6.80):

$$\alpha_I = C \cdot \frac{G^{0,1} \cdot q_{lpret.}^{0,7}}{d_u^{0,5}} \quad (6.80)$$

$$\alpha_I = 0,18599 \cdot \frac{153,48^{0,1} \cdot 6360^{0,7}}{0,016^{0,5}} = 1118 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Koeficijent prolaza topline sveden na unutrašnju površinu cijevne stijenke, jednačba (6.81):

$$k_I = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_I} + R_i + R_1 + \left(R_2 + \frac{1}{\alpha_w}\right) \cdot \frac{d_u}{d_v}} \quad (6.81);$$

$R_i = 0 \text{ m}^2\text{K/W}$  [10] – toplinski otpor na strani radne tvari zbog taloženja nečistoće za vrijeme eksploatacije isparivača.

$$k_I = \frac{1}{\frac{1}{1118} + 0 + 0,000071 + \left(0,0001 + \frac{1}{3437,7}\right) \cdot \frac{16}{20}} = 782,4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Iterativnim postupkom je u sljedećih nekoliko koraka dobivena konačna vrijednost koeficijenta prolaza topline u zoni I uz sve prethodno dobivene konstrukcijske i radne parametre.

$$k_I = 605 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ (usvojeno)}$$

- Specifični toplinski tok unutar zone I:

$$q_I = 605 \cdot 6,36 = 3847,8 \text{ W/m}^2$$

- Potrebna površina izmjene topline u zoni I, jednačba (6.47):

$$A_I = \frac{\Phi_I}{q_I}$$

$$A_I = \frac{1040,7 \cdot 10^3}{3847,8} = 270,5 \text{ m}$$

**6.4.2. Termodinamički proračun u zoni II:**

- Brzina strujanja radne tvari u cijevima, jednadžba (6.8):

$$q_{VRT} = \frac{q_{mRT}}{\rho_{II}}$$

$$q_{VRT} = \frac{6,17}{20,83} = 0,2962 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$v_{RT} = \frac{q_{VRT}}{A_s} = \frac{0,2962}{0,0402} = 7,4 \text{ m/s}$$

- Reynoldsov broj:

$$\text{Re} = \frac{v_{RT} \cdot d_u}{\nu_{II}}$$

$$\text{Re} = \frac{7,4 \cdot 0,016}{5,905 \cdot 10^{-7}} = 200508$$

- Koeficijent prijelaza topline na strani radne tvari u zoni II, jednadžba (6.38):

$$\alpha_{II} = f_r \cdot B_{RT} \cdot \frac{v_{RT}^{0,8}}{d_u^{0,2}}$$

$$\alpha_{II} = 1 \cdot 26,26 \cdot \frac{7,4^{0,8}}{0,016^{0,2}} = 297,8 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Koeficijent koji sadrži fizikalna svojstva radne tvari u zoni II, jednadžba (6.39):

$$B_{RT} = 0,023 \cdot \rho_{II}^{0,8} \cdot c_{II}^{0,4} \cdot \lambda_{II}^{0,6} \cdot \eta_{II}^{-0,4}$$

$$B_{RT} = 0,023 \cdot 20,83^{0,8} \cdot 866,4^{0,4} \cdot 0,01276^{0,6} \cdot (12,3 \cdot 10^{-6})^{-0,4} = 26,26$$

- Koeficijent prolaza topline sveden na unutrašnju površinu cijevne stijenke, jednačba (6.81):

$$k_{II} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{II}} + R_i + R_1 + \left(R_2 + \frac{1}{\alpha_w}\right) \cdot \frac{d_u}{d_v}}$$

$$k_{II} = \frac{1}{\frac{1}{297,8} + 0 + 0,000071 + \left(0,0001 + \frac{1}{3437,7}\right) \cdot \frac{16}{20}} = 267,3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Specifični toplinski tok unutar zone II:

$$q_{II} = k_{II} \cdot \Delta \vartheta_{mII}$$

$$q_{II} = 267,3 \cdot 5,08 = 1357,9 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- Potrebna površina izmjene topline u zoni II:

$$A_{II} = \frac{\Phi_{II}}{q_{II}}$$

$$A_{II} = \frac{9,3 \cdot 10^3}{1357,9} = 6,85 \text{ m}^2$$

- Ukupna površina izmjene topline svedena na unutarnju površinu cijevi, jednačba (6.66):

$$A_i = A_I + A_{II}$$

$$A_i = 270,5 + 6,85 = 277,35 \text{ m}^2$$

- Ukupna duljina cijevi isparivača, jednačba (6.24):

$$L_{ov} = \frac{A_i}{d_u \cdot \pi}$$

$$L_{ov} = \frac{277,35}{0,016 \cdot \pi} = 5517,7 \text{ m}$$

- Duljina izmjenjivača topline,  $L$ ; jednadžba (6.23):

$$L = \frac{L_{ov}}{n_t}$$

$$L = \frac{5517,7}{1200} = 4,6$$

- Broj dijelova pregrađenih segmentnim pregradama, jednadžba (6.82):

$$n_b = \frac{L}{b_s} \quad (6.82)$$

$$n_b = \frac{4,6}{0,5} = 9,2$$

$$n_b = 9 \text{ (usvojeno)}$$

- Pad tlaka na strani hladene vode pri nastrujavanju okomito na snop cijevi, jednadžba (6.83):

$$\Delta p_1 = \xi_1 \cdot \frac{\rho_w \cdot v_w^2}{2} \cdot 0,8 \cdot n_r \cdot n_b \cdot f_1 \cdot f_2 \quad (6.83)$$

$\zeta_1 = 0,55$  – lokalni koeficijent otpora strujanja [10].

$f_1 = 0,7$  – korekcijski faktor uslijed obilaznog strujanja između cijevnog snopa i plašta isparivača [10].

$f_2 = 0,6$  – korekcijski faktor uslijed strujanja kroz provrte u pregradama [10].

$$\Delta p_1 = 0,55 \cdot \frac{999,74 \cdot 0,271^2}{2} \cdot 0,8 \cdot 40 \cdot 9 \cdot 0,7 \cdot 0,6 = 2442,3 \text{ Pa}$$

- Pad tlaka uslijed strujanja duž cijevnog snopa isparivača, jednadžba (6.84):

$$\Delta p_2 = \xi_2 \cdot \frac{\rho_w \cdot v_l^2}{2} \cdot (n_b - 1) \quad (6.84)$$

$$\Delta p_2 = 2,2 \cdot \frac{999,74 \cdot 0,261^2}{2} \cdot (9 - 1) = 599,3 \text{ Pa}$$

$\zeta_2 = 2,2$  – lokalni koeficijent otpora strujanja [10].

- Brzina strujanja hladene vode duž cijevnog snopa isparivača, jednadžba (6.85):

$$v_l = \frac{q_{vmw}}{A_l} \quad (6.85)$$

$$v_l = \frac{0,0417}{0,16} = 0,261 \text{ m/s}$$

- Površina presjeka strujanja hladene vode duž cijevnog snopa isparivača, jednadžba (6.86):

$$A_l = 0,11113 \cdot D^2 - 0,79 \cdot d_u^2 \quad (6.86)$$

$$A_l = 0,11113 \cdot 1,2^2 - 0,79 \cdot 0,016^2 = 0,16 \text{ m}^2$$

- Pad tlaka pri strujanju hladene vode kroz priključke isparivača, jednadžba (6.87):

$$\Delta p_3 = \xi_3 \cdot \frac{\rho_w \cdot v_t^2}{2} \quad (6.87)$$

$v_t = 1 \text{ m/s}$  – brzina strujanja hladene vode kroz cijevni razvod; od rashladnika vode do hladnjaka zraka i nazad (preporučeno) [10].

$\zeta_3 = 1,5$  – lokalni koeficijent otpora strujanja. Ulazni priključak 0,5; a izlazni 1 [10].

$$\Delta p_3 = 1,5 \cdot \frac{999,74 \cdot 1^2}{2} = 750 \text{ Pa}$$

- Ukupni pad tlaka na isparivaču:

$$\Delta p_{uk} = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3$$

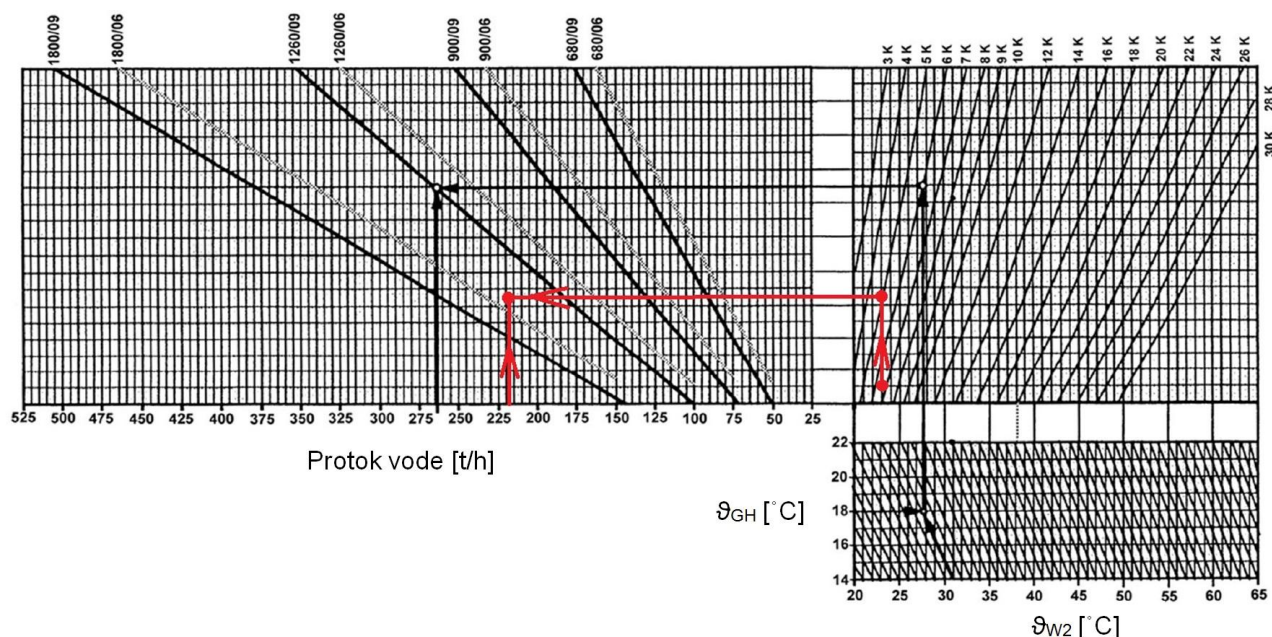
$$\Delta p_{uk} = 2442,3 + 599,3 + 750 = 3791,6 \text{ Pa} = 0,038 \text{ bar}$$

## 6.5. Odabir rashladnog tornja

Rashladni toranj je potreban zbog toga što vodu zagrijanu na kondenzatoru moramo ohladiti, a preuzeti toplinski tok predati okolišu. Do koje temperature ćemo moći ohladiti vodu na rashladnom tornju ovisi o temperaturi vlažnog termometra. Već je ranije u odlomku 6.1., na slici 6.3., iz h,x dijagrama određena temperatura granice hlađenja uz ostale vanjske projektne parametre – temperatura okolišnjeg zraka i relativna vlažnost;  $\vartheta_{GH} = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Rashladni učin kondenzatora iznosi 1260 kW. Uz uvjet da se voda na kondenzatoru zagrije za  $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  i specifični toplinski kapacitet vode od  $4,18 \text{ kJ/kgK}$ , dobiva se potrebni maseni protok rashladne vode od  $q_{mW} = 60,3 \text{ kg/s} = 217,08 \text{ t/h}$ . Za gustoću vode od  $995,12 \text{ kg/m}^3$  ispada  $q_{VmW} = 0,0606 \text{ m}^3/\text{s} = 218,2 \text{ m}^3/\text{h}$ . Temperatura ulazne vode u rashladni toranj iznosi  $\vartheta_{w2} = 33 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Iz dijagrama i kataloga proizvođača, tvrtka »Esotehna«, Krapina; odabran je tip rashladnog tornja. Dijagram na slici 6.8. prikazuje način odabira za zadane parametre. Radna točka se nalazi između dviju linija tipova rashladnih tornjeva, te se odabire prvi veći. Odabrani tip je EWK 1800/06 s frekventno reguliranim elektromotorom na temelju temperature ohlađene vode.



Slika 6.8. Dijagram odabira rashladnog tornja [13]

## 6.6. Rekapitulacija odabranih osnovnih komponenata rashladnog postrojenja

Centralno rashladno postrojenje čine:

- Centrifugalni rashladnik vode
- Cirkulacijske pumpe kruga rashladnika, kruga spremnika i kruga zgrade
- Rashladni toranj
- Sustav za punjenje i nadopunjavanje hladene i rashladne vode
- Cijevni razvod s odgovarajućom opremom i armaturom
- Sustav elektroenergetskog napajanja, elektromotornih razvoda te upravljanja postrojenjem rashladnog sustava.

Sustav obuhvaća jedan vodom hlađeni rashladnik vode s centrifugalnim kompresorom promjenjive brzine vrtnje, rashladnog učina 1,055 MW. Parametri vode u isparivačkom krugu iznose 6/12°C s pumpom konstantnog protoka i kondenzatorskom krugu 28/33°C s mogućnošću regulacije rashladnog učina pri varijabilnom protoku vode. U sustavu će se koristiti jedan rashladna toranj. Učin tornja iznosi 1,26 MW, 28/33°C, s frekventno reguliranim elektromotorima za pogon ventilatora, elektrogrijačem s termičkom zaštitom i nivo sondom za automatsku regulaciju razine vode u sabirnoj posudi na dnu tornja.



Jedna radna i jedna rezervna cirkulacijska pumpa hladene vode s konstantnim protokom  $q_{vmW} = 181,4 \text{ m}^3/\text{h}$ , visine dizanja  $H = 5 \text{ m}$ .

Jedna radna i jedna rezervna cirkulacijska pumpa hladene vode s frekventno reguliranim elektromotorom i varijabilnim protokom hladene vode (VPF = variable primary flow); karakteristika  $q_{vmW} = 150,1 \text{ m}^3/\text{h}$ , visine dizanja  $H = 11 \text{ m}$ .

Jedna radna i jedna rezervna cirkulacijska pumpa rashladne vode s frekventno reguliranim elektromotorom i reguliranom temperaturom rashladne na ulazu u kondenzator, karakteristika  $q_{vmW} = 218,2 \text{ m}^3/\text{h}$ , visine dizanja  $H = 11,5 \text{ m}$ . Ekspanzijski sustav s membranskom posudom  $V = 40 \text{ l}$ .

Sustav za tretman hladene i rashladne vode za punjenje i dopunjavanje sustava s uređajem za mjerenje vodljivosti rashladne vode te automatskim doziranjem biocida i inhibitora.

Tablica 6.2. Troškovnik opreme rashladnog postrojenja

<b>Rashadnik vode</b> s vodom hlađenim kondenzatorom i centrifugalnim kompresorom, za ugradnju u zatvorenom prostoru – strojarnici. Mikroprocesorsko upravljanje s ekološki prihvatljivim radnim medijem R407 C. Radni parametri hladene vode: temp. 6/12°C i protok 181,4 m <sup>3</sup> /h. Proizvod kao »Daikin« - tip EWWDC10FZXS.	kom	1
<b>Radna i rezervna cirkulacijska pumpa</b> konstantnog protoka za transport hladene vode 6/12°C, $q_{vmW} = 181,4 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H = 5 \text{ m}$ . Proizvod kao »Grundfos« NK 100-200/178	kom	2
<b>Radna i rezervna cirkulacijska pumpa</b> za transport hladene vode 6/12°C, $q_{vmW} = 150,1 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H = 11 \text{ m}$ ; s motorom predviđenim za frekventnu regulaciju. Proizvod kao »Grundfos« NK 100-200/195	kom	2
<b>Radna i rezervna cirkulacijska pumpa</b> za transport kondenzatorske vode 6/12°C, $q_{vmW} = 218,2 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H = 11,5 \text{ m}$ ; s motorom predviđenim za frekventnu regulaciju. Proizvod kao »Grundfos« NK 150-200/218-208	kom	2

<b>Rashladni toranj</b> – otvoreni tip, za hlađenje kondenzatorske vode, $q_{vmW} = 218,2 \text{ m}^3/\text{h}$ , $q_{vZrak} = 54 \text{ m}^3/\text{s}$ Proizvod kao »Esotehna, Krapina« - tip EWK 1800/06	kom	1
<b>Hidraulična skretnica</b> ; proizvod kao »ITG Sarajevo« - tip HSK 300/200.	kom	1
<b>Horizontalna membranska ekspanzijska posuda</b> s priključcima za odzračivanje, manometar i slavinu za ispušt. Proizvod kao »Varem« - tip LS H 40	kom	1
<b>Prolazni ventil s motornim pogonom</b> DN25 (ventil + motorni pogon). Ventil: proizvod kao »Danfoss« - tip VRB. Motorni pogon: proizvod kao »Danfoss« - tip AMV/E335	kom	50
<b>Regulator diferencijalnog tlaka</b> DN25. Proizvod kao »Danfoss« - tip ASV-PV.	kom	10
<b>Nepovratni ventil</b> DN250 NP16 za ugradnju u horizontalni ili vertikalni cjevovod u kompletu s protuprirubicama, brtvama i vijcima. Proizvod kao »Gestra«.	kom	6
<b>Hvatač nečistoća</b> DN250 NP16 za ugradnju u horizontalni ili vertikalni cjevovod u kompletu s protuprirubicama, brtvama i vijcima. Proizvod kao »Gestra«.	kom	1
<b>Prirubnički gumeni kompenzator vibracija</b> DN250	kom	10
<b>Zaporni ventil</b> – leptirasta zaklopka DN65 i DN250. Proizvod kao »Gestra«.	kom	1 23
<b>Ispusna slavina</b>	kom	3
<b>Cijevni osjetnik temperature</b> -30....130°C, LG-Ni1000 Proizvod kao »Siemens« - tip QAE2120.015	kom	3
<b>Manometar</b> za hlađenu i rashladnu vodu, mjernog područja 0-10 bar.	kom	3
<b>Bimetalni termometar</b> za hlađenu i rashladnu vodu, mjernog područja 0- 60°C.	kom	5
<b>Regulator</b> proizvod kao »Siemens« - tip PXC36 – E.D.	kom	1

<b>Bešavne čelične cijevi</b>		
DN250 – 267x8 (cjevovod otočne rashladne vode)	m	25
DN250 – 267x10 (cjevovod otočne hladene vode)	m	80

## 7. Zaključak

Početnom analizom građevinske izvedbe objekta tvornice obuće »Bema« u kojem je smješten proizvodni pogon utvrđeno je da se za vrijeme gradnje nije vodilo računa o postavljanju toplinske izolacije na vanjsko oplošje. Izolacijom bi se znatno smanjili toplinski dobici izvana za vrijeme ljetnog perioda, dok bi se tokom zimskog perioda smanjio gubitak topline grijanog prostora prema vanjskom okolišu. Kao drugi problem, tu je veliki udio ostakljenja po oplošju objekta zbog čega postoji direktan upad sunčeva zračenja – vanjski toplinski dobitak. Rješenje ovog problema može biti u postavljanju kvalitetnijih zaštita za smanjenje upada sunčeva zračenja – žaluzine i to s vanjske strane objekta ili postavljanje premaza na staklene površine koji će propuštati kratkovalno zračenje.

Kao najdominantniji unutarnji toplinski dobici su strojevi koji imaju veliku disipaciju topline u prostor.

Istovremenim djelovanjem vanjskih i unutarnjih toplinskih dobitaka na toplinsko opterećenje objekta, ispada da je ono najveće u mjesecu srpnju, s iznosom od 1,03 MW.

Analizom pogonskih troškova dvije vrste sustava – indirektni s akumulacijom i bez akumulacije, utvrđeno je da sustav s akumulacijom postiže uštede na godišnjoj razini od oko 38 000 kuna. Međutim, ako se uzmu u obzir znatno veći investicijski troškovi sustava s akumulacijom u odnosu na sustav bez akumulacije, zajedno s godišnjom uštedom pogonskih troškova, ispada da bi vrijeme povrata investicije sustava s akumulacijom trajalo vrlo dugo – preko 20 godina. Zbog toga je za ovaj slučaj odabran indirektni sustav bez akumulacije.

## 8. Literatura:

- [1] I. Balen, Klimatizacija – podloge za predavanje, FSB Zagreb, 2008.
- [2] H. Recknagel, E. Sprenger, E. Schramek, Grejanje i klimatizacija – 7. izdanje, Vrnjačka Banja, 2011.
- [3] A. Galović, Termodinamika 2, FSB Zagreb, 2010.
- [4] Proračun rashladnog tereta za klimatizirane prostore – VDI 2078
- [5] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, »Narodne novine«, broj 153/2013., čl. 29.
- [6] Plexiglas – general information and physical properties; [www.altuglasint.com](http://www.altuglasint.com)
- [7] Sustavi grijanja u zgradarstvu – metoda proračuna toplinskog opterećenja prema 12831; podloge za vježbu iz predmeta Grijanje na FSB – u.
- [8] Tehničke karakteristike kopelit stakla; [www.egle.hr](http://www.egle.hr)
- [9] B. Kraut, Strojarski priručnik, Zagreb, 1976.
- [10] R.Ciconkov, Refrigeration solved examples, Faculty of mechanical engineering, University Sv. Kiril and Metodij, Skopje, 2001.
- [11] Toplinske tablice – FSB, Zagreb 2008.
- [12] T. Ćurko, S. Mudrinić, Radne tvari u tehnici hlađenja – freon R407C, Zagreb, 2000.
- [13] [www.esotehna.hr](http://www.esotehna.hr)
- [14] [www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com)
- [15] B. Slipčević, Razmjenjivači topline sa primjerima iz rashladne tehnike, Beograd 1989.
- [16] M. Grozdek, Load Shifting and Storage of Cooling Energy through Ice Bank or Ice Slurry Systems - modelling and experimental analysis. Doktorski rad. Stockholm, Sweden: Kungliga Tekniska Högskolan (Royal Institute of Technology), Department of Energy Technology, Listopad 2009.

[17] M.Grozdek, L.Lepoša, M.Briek, T.Ćurko: „Sustav hlađenja sa spremnikom hladne vode kao akumulatorom rashladnog učinka“ , Klima-Forum, Zadar 2011.

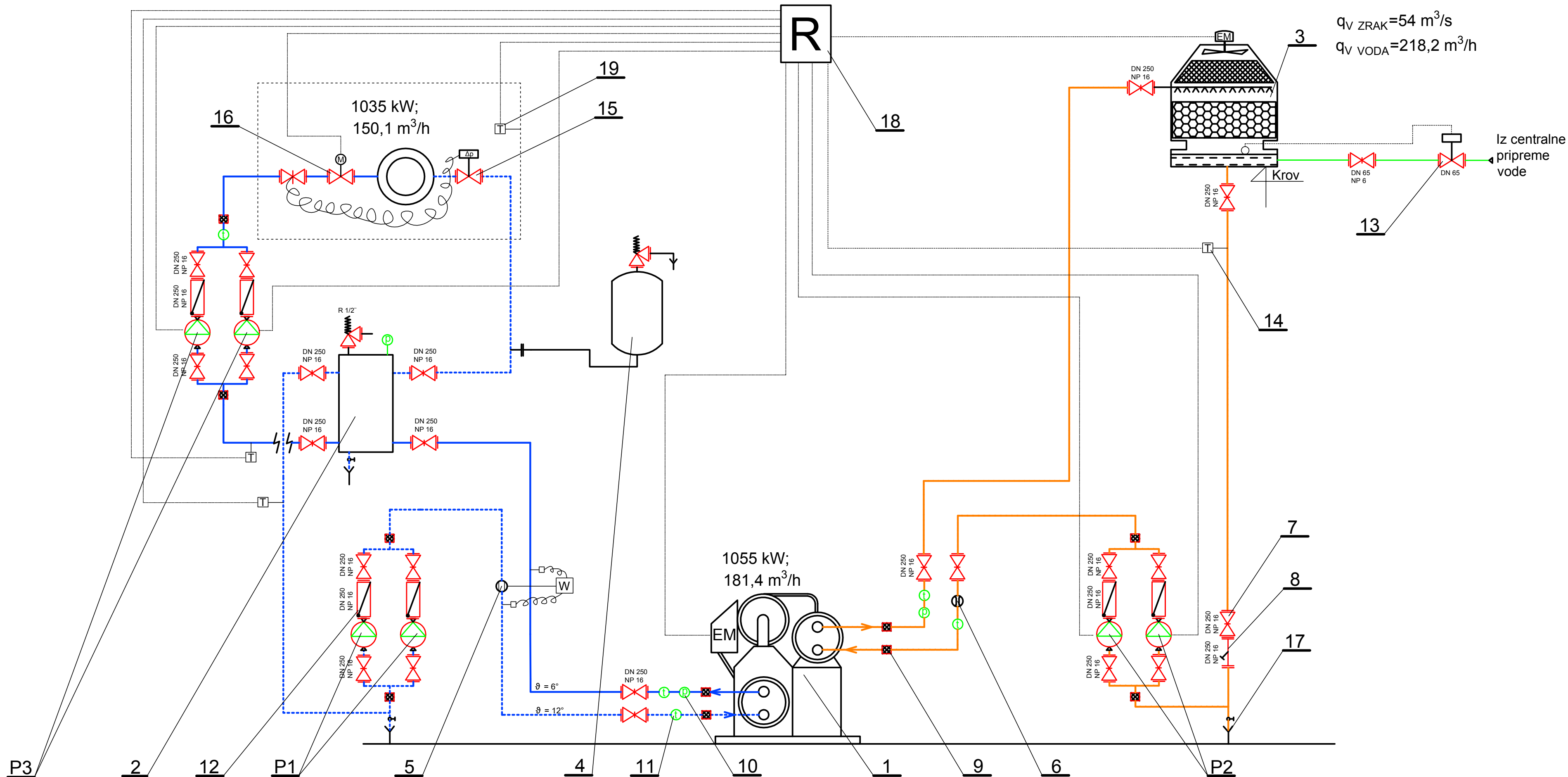
[18] T. Urbaneck: „First large scale chilled water stores in Germany”

[19] C.E. Dorgan, J.S. Elleson: „Design guide for cool thermal storage“, ASHRAE, 1994.

[20] [www.elektroprivreda.ba](http://www.elektroprivreda.ba), zadnji pristup stranici 15.4.2015.

[21] ASHRAE Handbook: HVAC Systems and Equipment 2008.

## **Grafička dokumentacija**

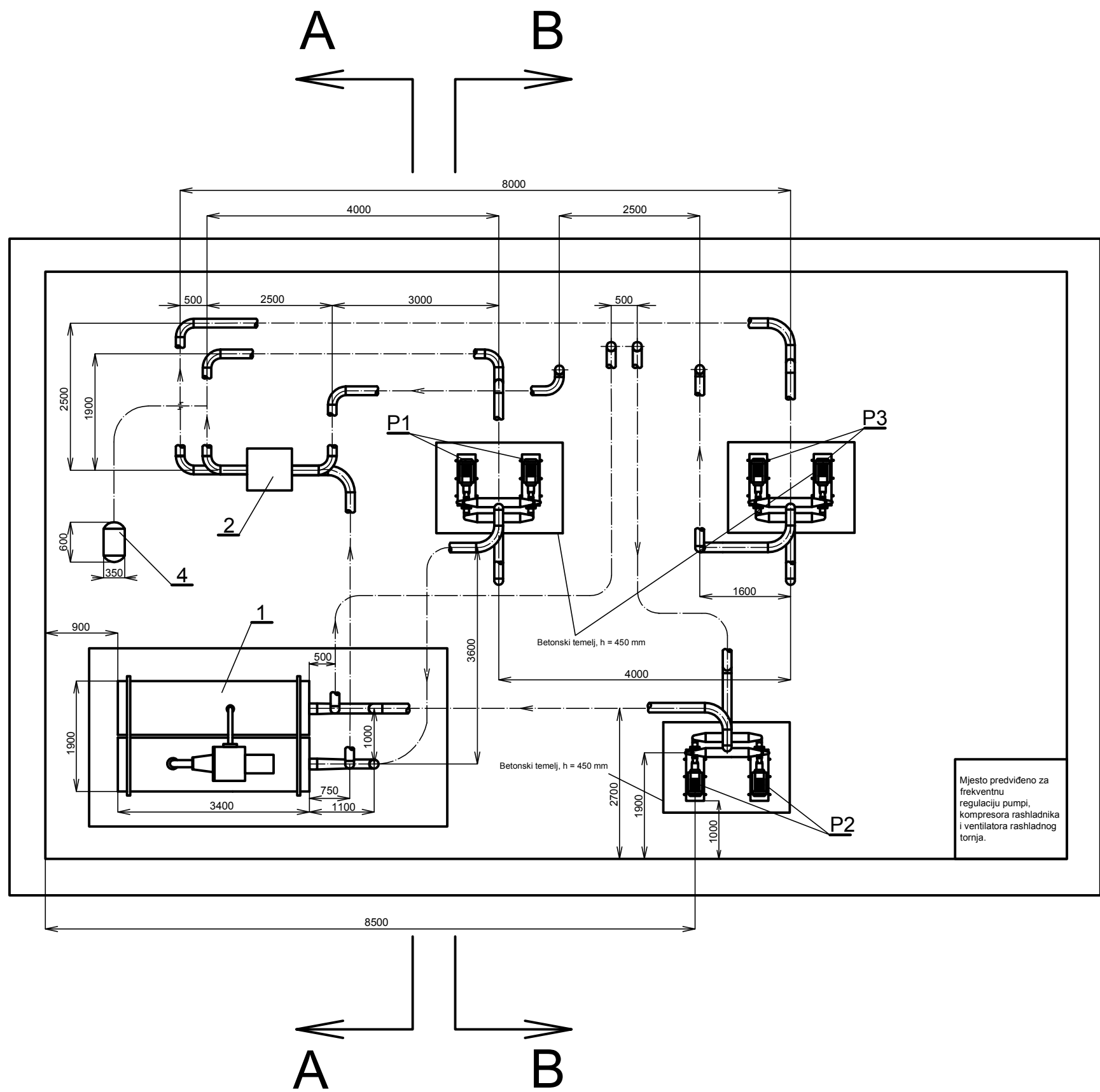


NAPOMENA:  
Sve polazne i povratne dionice cjevovoda hladene vode izolirati izolacijom ARMAFLEX zbog sprječavanja kondenzacije vlage iz zraka

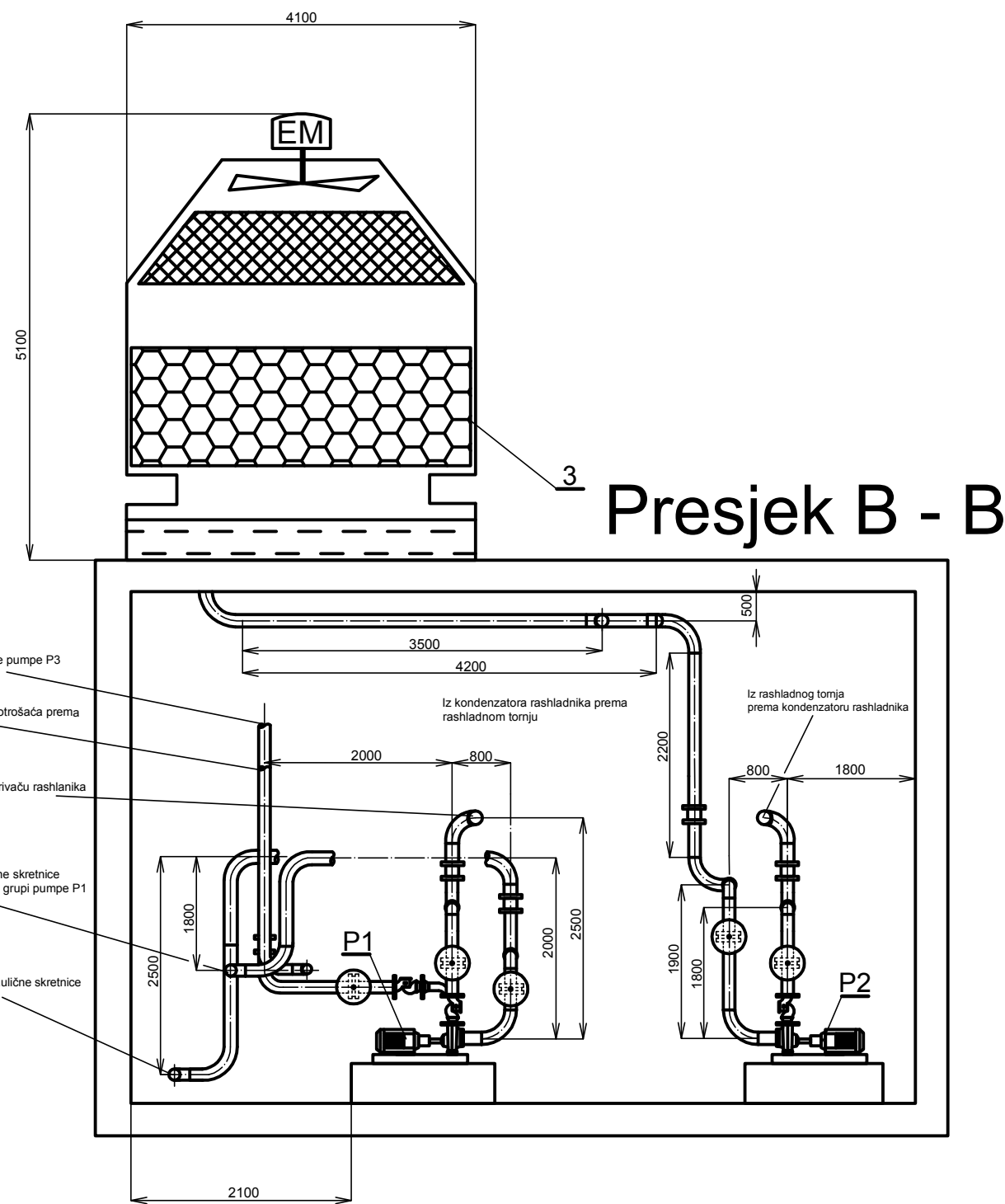
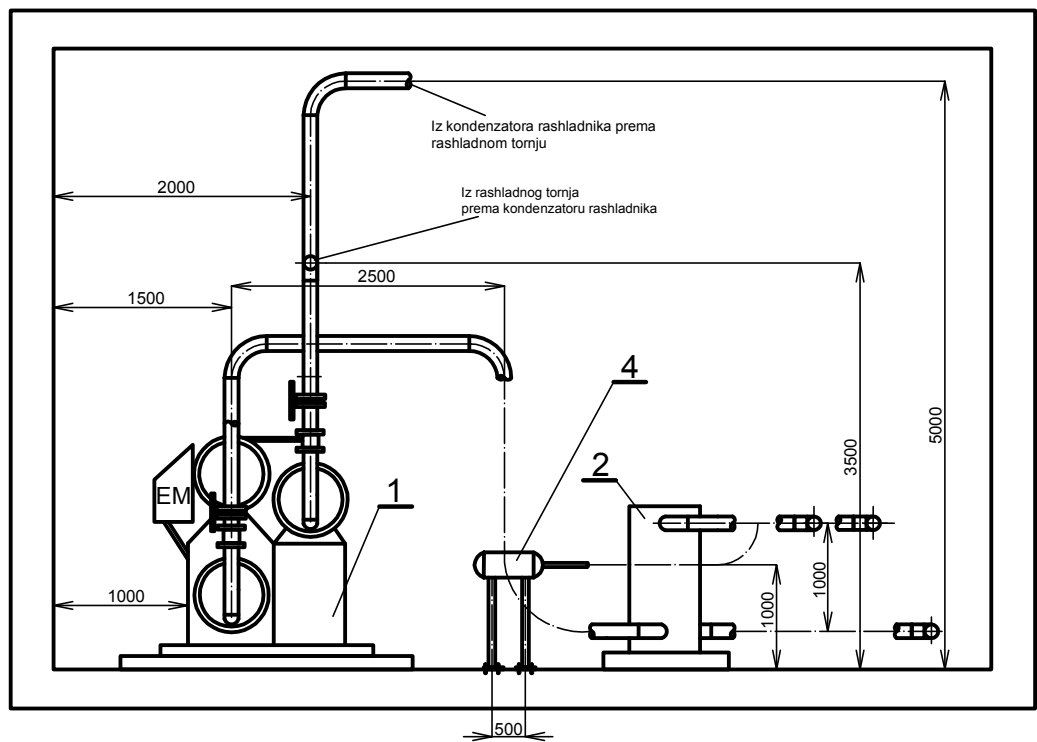
P3	Frekventno regulirana centrifugalna crpka, proizvod kao "Grundfos" - tip NK 100-200/195	1
P2	Frekventno regulirana centrifugalna crpka, proizvod kao "Grundfos" - tip NK 150-200/218-208	1
P1	Jednostupanjska centrifugalna crpka, proizvod kao "Grundfos" - tip NK 100-200/178	1
19	Osjetnik temperature zraka u prostoriji	1
18	Regulator	1
17	Slavina ispusta vode	3
16	Prolazni ventil s motornim pogonom DN25	50
15	Regulator diferencijalnog tlaka	10
14	Cijevni osjetnik temperature	3
13	Ventil s plovkom DN65	1
12	Nepovratni ventil DN250 NP16	6
11	Bimetalni termometar	5
10	Manometar	3
9	Cijevni kompenzator vibracija	10
8	Filtar nečistoća DN250 NP16	1

7	Zaporni ventil DN65 NP16	1				
7	Zaporni ventil DN250 NP16	23				
6	Protokomjer NO 250	1				
5	Kalorimetar NO 250	1				
4	Zatvorena ekspanzijska posuda sa sigurnosnim ventilom, proizvod kao "Varem" - tip LS H 40	1				
3	Rashladni toranj, proizvod kao "Esotehna Krapina" - tip EWK 1800/06	1				
2	Hidraulična skretnica, proizvod kao "ITG Sarajevo" - tip HSK 300/200	1				
1	Rashladnik vode, proizvod kao "Daikin" - tip EWWDC10FZXS, $\Phi_0=1055$ kW	1				
Poz.	Naziv dijela		Kom.			
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b> Studij strojarstva	
Projektirao		1.7.2015.	Denis Piljek			
Razradio		1.7.2015.	Denis Piljek			
Crtao		1.7.2015.	Denis Piljek			
Pregledao						
Mentor						
ISO - tolerancije		Objekt:			Objekt broj:	
					R. N. broj:	
		Napomena:			Smjer:	Kopija
					Procesno - energetski	
		Materijal:	Masa:	DIPLOMSKI RAD		
			Naziv:			Pozicija:
		Mjerilo originala	Shema spajanja i regulacije rashladnog sustava			Format:
						Listova:
		Crtež broj:				List:





Presjek A - A



P3	Frekventno regulirana centrifugalna crpka, proizvod kao "Grundfos" - tip NK 100-200/195				1	
P2	Jednostupanjnska centrifugalna crpka, proizvod kao "Grundfos" - tip NK 150-200/218-208				1	
P1	Jednostupanjnska centrifugalna crpka, proizvod kao "Grundfos" - tip NK 100-200/178				1	
4	Zatvorena ekspanzijska posuda sa sigurnosnim ventilom, proizvod kao "Varem" - tip LS H 40				1	
3	Rashladni toranj, proizvod kao "Esotehna Krapina" - tip EWK 1800/06				1	
2	Hidraulična skretnica, proizvod kao "ITG Sarajevo" - tip HSK 300/200				1	
1	Rashladnik vode, proizvod kao "Daikin" - tip EWWDC10FZXs, $\Phi_0=1055$ kW				1	
Poz.	Naziv dijela				Kom.	
Broj naziva - code			Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>  Studij strojarstva
		Projektirao	1.7.2015.	Denis Piljek		
		Razradio	1.7.2015.	Denis Piljek		
		Crtao	1.7.2015.	Denis Piljek		
		Pregledao				
		Mentor				
ISO - tolerancije		Objekt:			Objekt broj:	
					R. N. broj:	
		Napomena:			Smjer:	
					Procesno - energetski	
		Materijal:		Masa:	DIPLOMSKI RAD	
		Naziv:			Pozicija:	
		Mjerilo originala			Format: A2	
		Dispozicijski crtež strojarne			Listova: 1	
		Crtež broj:			List: 2	